

Universidade Nova de Lisboa
Faculdade de Ciências e Tecnologia
Departamento de Engenharia Electrotécnica

Sistema de Armazenamento de Energia em Bobinas Supercondutoras

José Francisco Alcario Bergano Oliveira

Dissertação apresentada na Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Electrotécnica e de Computadores.

Orientador: Prof. Doutor Mário Fernando Ventim Neves

Co-orientador: Eng. João Murta Pina

Lisboa

2010

A los míos...

Resumo

Os sistemas SMES ao oferecerem compensações de potência flexíveis e rápidas são aplicados em sistemas de energia para fornecer estabilidade na rede eléctrica e qualidade energética.

Nesta tese apresenta-se um resumo das aplicações dos SMES em sistemas de energia. São descritas de forma sucinta algumas das aplicações dos SMES em sistemas de energia e são dados alguns esquemas e equações fundamentais.

É feito o dimensionamento duma bobina através de uma análise por elementos finitos, com o Flux2D®. Finalmente, é mostrado o projecto de um sistema SMES para fornecer qualidade energética. A sua viabilidade é suportada pelos resultados da simulação do modelo desenvolvido utilizando o software Matlab/Simulink®.

Abstract

Superconducting magnetic energy storage (SMES) systems offer us a fast and flexible form of energy compensation that can be used to provide network stability and quality in energy systems.

In this dissertation we will present the SMES systems that can be applied in such energy systems. We will be thoroughly covering the way that they can be used in such applications and will present some of the main designs and fundamental equations on the topic.

Through a finite element method and using Flux2D®, we will design a coil. Finally, we present a project of a SMES system that supplies energetic quality. We validate our results using by simulating a model developed under Matlab/Simulink® software.

Índice

Resumo	v
Abstract	vii
Simbologia	xv
Lista de símbolos	xv
Subscritos	xvi
Abreviaturas	xvi
1 Introdução	1
1.1 Motivação	1
1.2 Objectivos	2
1.3 Sumário do trabalho desenvolvido	2
1.4 Organização da dissertação	3
2 Revisão bibliográfica	5
2.1 Introdução	5
2.2 Evolução dos SMES	5
2.2.1 LTS SMES	6
2.2.2 HTS SMES	7
2.3 Conclusão	10
3 Supercondutividade	11
3.1 Introdução	11
3.2 Um pouco de história	11
3.3 O que é a supercondutividade?	13
3.3.1 Supercondutores do Tipo I e do Tipo II	14
3.3.2 Teoria da supercondutividade: teoria BCS	15
3.4 Conclusão	17
4 Sistema SMES	19
4.1 Introdução	19

4.2 Classificação dos SMES.....	19
4.3 Topologia de um sistema SMES	20
4.3.1 Bobina supercondutora.....	21
4.3.2 Sistema de conversão de potência (SCP)	22
4.3.3 Sistema de controlo	23
4.3.4 Sistema de refrigeração	23
4.4 Sistemas SMES aplicados nas redes eléctricas	23
4.4.1 Segmento de produção	24
4.4.2 Segmento de transporte	25
4.4.3 Segmento de distribuição	25
4.5 Soluções SMES	27
4.5.1 Aplicações para melhorar a estabilidade na rede	28
4.5.2 Aplicações para melhorar a qualidade da energia.....	30
4.6 Conclusão	36
5 Projecto de um sistema SMES	37
5.1 Introdução.....	37
5.2 Identificação do problema.....	37
5.2.1 Características da falha: <i>cava de tensão</i>	37
5.3 Princípio de funcionamento do sistema SMES	38
5.3.1 Bobina Supercondutora	38
5.3.2 Sistema de conversão de potência.....	44
5.3.3 Sistema de controlo	54
5.4 Conclusão	56
6 Dimensionamento da bobina supercondutora	58
6.1 Introdução.....	58
6.2 Fita BSCCO-2223	58
6.3 Projecto da bobina supercondutora	59

6.3.1 Identificação do problema	59
6.3.2 Especificações da fita.....	60
6.3.3 Parâmetros da SMES	60
6.3.4 Dimensionamento no Flux2D®.....	60
6.4 Conclusão.....	64
7 Implementação do sistema SMES em Matlab/Simulink ®	65
7.1 Introdução	65
7.2 Controlo da bobina supercondutora.....	65
7.3 Modelo do sistema SMES.....	69
7.3.1 Falha: cava de tensão	70
7.3.2 Controlo do sistema	71
7.3.3 Ligação DC	74
7.3.4 Filtro.....	75
7.3.5 Resultados	75
7.4 Conclusão.....	79
Conclusão.....	81
Referências.....	83
Anexo I	87
Transformada de Clarke e Park [38,45].....	87

Índice de figuras

Figura 2.1. Sistema SMES de 30 MJ da Subestação de Tacoma [6].....	6
Figura 2.2. Bobina toroidal de 20 MWh à escala [16].....	8
Figura 3.1. Curva da resistividade eléctrica do mercúrio [27].....	11
Figura 3.2. Evolução dos Supercondutores e respectivas temperaturas críticas [27].....	13
Figura 3.3. Superfície crítica de um supercondutor [26].....	14
Figura 3.4. Curva de Resistividade de um Supercondutor tipo I, à esquerda, e tipo II à direita.....	14
Figura 3.5. Curva de magnetização de um supercondutor: tipo I, à esquerda, e tipo II, à direita.....	15
Figura 3.6. Rede cristalina, à esquerda. Rede cristalina com um electrão com movimentos aleatório [27].....	15
Figura 3.7. Par de Cooper.....	16
Figura 3.8. Movimento do Par de Cooper ao longo da rede cristalina.....	16
Figura 4.1. Esquema básico de um sistema SMES.....	20
Figura 4.2. Formas das bobinas: Solenóide, à esquerda; Toróide, à direita.....	21
Figura 4.3. Forças electromagnéticas radiais (setas a preto), na bobina solenoidal.....	22
Figura 4.4. Exemplo dos segmentos da rede eléctrica, com unidades SMES no segmento de distribuição e consumidores finais (adaptado de [1]).....	24
Figura 4.5. Relação potência/energia por unidade de massa, para os SMES, as baterias e os condensadores (adaptado de [14]).....	26
Figura 4.6. Tempo de descarga em função da potência para algumas tecnologias de armazenamento (adaptado de [14]).....	27
Figura 4.7. Resumo de aplicações da tecnologia SMES em redes de energia (adaptado de [31]).....	28
Figura 4.8. Topologia de sistema de transporte de energia com unidade SMES para reduzir oscilações [31].....	28
Figura 4.9. Topologia típica de um sistema de equilíbrio de carga flutuante com unidade SMES [31].....	32
Figura 4.10. Configuração de um sistema SMES para equilibrar as assimetrias do sistema de energia [31].....	33

Figura 4.11. Formas de onda para um sistema equilibrado, à esquerda. Formas de onda, com unidade SMES para equilibrar o sistema devido a componentes harmónicas na carga [31]....	34
Figura 4.12. Características de potência/energia das potenciais aplicações SMES [32].....	35
Figura 5.1. Quebra/interrupção de tensão de tensão (adaptado [34]).....	38
Figura 5.2. Exemplo de uma bobina.....	38
Figura 5.3. Evolução da corrente de descarga para diferentes ϵ	41
Figura 5.4. Evolução da energia de descarga para diferentes ϵ	42
Figura 5.5. Evolução da corrente e da energia no modo de carga.....	43
Figura 5.6. Conversor “chopper” com bobina e quadrantes de funcionamento do conversor.....	44
Figura 5.7. Sentido da corrente no modo de descarga.....	45
Figura 5.8. Sentido da corrente para o modo de carga (à esquerda) e para o modo persistente (à direita).....	45
Figura 5.9. Curvas da corrente e energia para o funcionamento nominal.....	46
Figura 5.10. Conversor AC/DC bidireccional.....	47
Figura 5.11. Exemplo de uma modulação PWM por sub-harmónica aplicada a um conversor AC/DC.....	48
Figura 5.12. Forma de onda das tensões simples à saída do inversor.....	49
Figura 5.13. Forma de onda da tensão composta à saída do conversor com representação da harmónica fundamental (adaptado de [13]).....	50
Figura 5.14. Tensões simples, compostas e tensão de saída da rectificação.....	50
Figura 5.15. Ligação DC.....	52
Figura 5.16. Filtro passa-baixo monofásico de ordem 2.....	53
Figura 5.17. Diagrama de Bode de $G(s)$ para vários ξ	53
Figura 5.18. Fluxo grama do funcionamento do sistema de controlo.....	54
Figura 5.19. Topologia do controlador de corrente e de tensão.....	54
Figura 6.1. Curva da resistividade do BSCCO-2223 (adaptado de [38]).....	58
Figura 6.2. Vista de cima da bobina.....	60
Figura 6.3. Curva do de cada L para cada R_i em função do N	60
Figura 7.1. Conversor “chopper” com bobina supercondutora.....	63
Figura 7.2. Controladores de: a) corrente; b) tensão.....	64
Figura 7.3. Resultado da simulação de carga e descarga da bobina supercondutora inserida no “chopper”.....	66

Figura 7.4. Modelo completo da rede e carga, com sistema SMES.....	67
Figura 7.5. Modelo da quebra de tensão.....	68
Figura 7.6. Sistema de controlo.....	69
Figura 7.7. Modelo do Regulador de tensão.....	70
Figura 7.8. Modelos do Detetor de falha, para o modelo sem filtro, a); e com filtro, b).....	70
Figura 7.9. Modelo do Controlador DC/DC.....	71
Figura 7.10. Modelo do Gerador PWM.....	71
Figura 7.11. Filtro passa-baixo.....	73
Figura 7.12. Resultado do modelo geral sem sistema SMES.....	74
Figura 7.13. Tensões simples do modelo geral sem filtro.....	74
Figura 7.14. Tensões compostas do modelo geral sem filtro.....	75
Figura 7.15. Tensão na ligação DC (superior) e corrente na bobina (inferior), para o modelo sem filtro.....	75
Figura 7.16. Resultado de simulação de modelo geral com sistema SMES e filtro.....	76
Figura 7.17. Tensão na ligação DC (superior) e corrente na bobina (inferior), para o modelo com filtro.....	77

Índice de tabelas

Tabela 2.1. Projectos de SMES na Europa iniciados em 2001 (adaptado de [24]).....	9
Tabela 4.2. Classificação das SMES (adaptado de [1]).....	20
Tabela 4.2. Vantagens e desvantagens entre bobinas em forma solenóide e toróide.....	21
Tabela 4.3. Aplicações de SMES (adaptado de [1]).....	23
Tabela 6.1. Parâmetros do sistema.....	58
Tabela 6.2. Características da fita supercondutora.....	59
Tabela 6.3. Parâmetros para a bobina supercondutora.....	59
Tabela 6.4. Coeficientes de auto-indução para cada R_i (N).....	60
Tabela 6.5. Comprimento total de fita para cada $R_i(N)$	61

Simbologia

Lista de símbolos

W Energia

P Potência activa

Q Potência reactiva

U Tensão

i Corrente

ΔP Variação de potência activa

ΔQ Variação de potência reactiva

ΔU Variação de tensão

ΔI Variação de corrente

R Resistência eléctrica

L Indutância

C Capacidade

T Temperatura

H Campo magnético

B Densidade de campo magnético

J Densidade de corrente

μ Permeabilidade magnética

σ Tensão magnética

M Massa

Vol Volume

ε débito de energia

ω Velocidade angular

f Frequência

s Operador matemático usado no cálculo operacional

K_p Ganho proporcional do controlador PI

T_i Constante de tempo integral do controlador PI

ξ Coeficiente de amortecimento

Subscritos

a,b,c Parâmetros trifásicos

d,q Componentes directa e em quadratura no referencial difásico girante dq

nom Nominal

ref Referência

Abreviaturas

SMES Superconducting Magnetic Energy Storage

HTS High Temperature Superconducting

LTS Low Temperature Superconducting

C_{AC/DC} Conversor de potência AC/DC bidireccional

C_{DC/DC} Conversor de potência DC/DC

IGBT Insulated-Gate Bipolar Transistor

DC Direct Current

AC Alternating Current

PWM Pulse Width Modulation

PI Proporcional Integral

FACTS Flexible AC Transmission System

1 Introdução

1.1 Motivação

Nos últimos anos têm-se feito sentir grandes alterações climáticas, devido à poluição, e um aumento brutal no consumo de energia (sob todas as formas). A escassez cada vez maior dos combustíveis fósseis, que são, ainda, o pilar energético da sociedade actual, tem provocado inúmeras reflexões sobre a necessidade de mudança, sensibilizando a sociedade de forma a poder evoluir de maneira sustentável.

O aumento abrupto de consumo de energia eléctrica é uma das causas destes problemas. Assim, assume-se como um factor crucial da actualidade ter-se energia eléctrica de forma eficiente e com qualidade.

Este sector, nas últimas duas décadas, tem atravessado profundas mudanças. O aparecimento de auto-produtores e questões ambientais associadas às tecnologias de produção tem provocado grandes alterações no sector energético. Também a alteração da natureza das cargas, como o aumento significativo de dispositivos electrónicos (não lineares e sensíveis) na indústria, tem tido grande influência nessas alterações. Existe, assim, a necessidade de melhorar a nossa energia, sendo necessário torná-la mais estável e com maior qualidade [1].

Segundo [1], problemas de qualidade de energia podem provocar a paragem total de uma fábrica ou o mau funcionamento desta, tendo, assim, custos bastantes elevados.

Cavas e interrupções de tensão são problemas momentâneos (ordem do segundo), e são a mais séria perturbação a nível da qualidade de energia.

De entre todas as tecnologias emergentes neste domínio, há uma área merecedora de especial atenção: a referente às *tecnologias de armazenamento de energia eléctrica*.

O armazenamento de energia é uma forma de tornar a utilização de energia mais eficiente. O armazenamento de energia pode ser caracterizado pelas várias formas de armazenamento: Eléctrico (super-condensadores, SMES – Superconducting Magnetic Energy Storage), Mecânico (Volantes de Inércia, Ar Comprimido), Electroquímico (baterias), Químico (Célula de Combustível), Térmica (Vapor) [2].

O sistema SMES apresenta-se como um dos mais eficientes para falhas momentâneas. As suas baixas perdas fazem com que este seja um sistema promissor, apresentando um rendimento de 90%, tendo já em conta as perdas do sistema de refrigeração [2,3].

A conjugação destes factores suscita algum interesse no desenvolvimento deste tipo de sistema, podendo, estes, virem a ser uma tecnologia bastante eficiente no que diz respeito tanto a nível de estabilidade das redes como de qualidade energética.

1.2 Objectivos

Com este trabalho pretende-se estudar a aplicabilidade e benefício dos sistemas SMES na rede eléctrica. O objectivo principal é mostrar a aplicação desta tecnologia em sistemas de distribuição onde falhas momentâneas (na ordem dos milissegundos) se fazem sentir.

Para cumprir tal objectivo faz-se o dimensionamento da bobina supercondutora, através de uma análise por elementos finitos recorrendo à aplicação informática Flux2D ® (da companhia Cedrat), e posteriormente desenvolve-se um sistema em Matlab/Simulink ®, para ensaiar e resolver a falha em causa.

1.3 Sumário do trabalho desenvolvido

O trabalho desenvolvido nesta dissertação seguiu os seguintes passos até à conclusão:

- Revisão bibliográfica referente aos sistemas SMES.
- Breve estudo da supercondutividade.
- Estudo dos sistemas SMES e suas aplicações nas redes de energia eléctrica.
- Projecto de um sistema SMES para uma determinada falha, cava de tensão, numa rede de distribuição.
- Dimensionamento da bobina supercondutora, com recurso ao programa de elementos finitos, Flux2D®.
- Realização de simulações de um sistema SMES para uma determinada falha num determinado segmento da rede.

1.4 Organização da dissertação

A presente dissertação encontra-se dividida em oito capítulos, incluindo o presente, Introdução, que estão enumerados seguidamente:

2. Revisão Bibliográfica:

No segundo capítulo apresentam-se um estudo sobre a evolução dos SMES, fazendo-se uma pequena distinção de entre as duas sub-tecnologias envolventes: LTS¹ SMES e HTS² SMES.

3. Supercondutividade:

Visto o fenómeno da supercondutividade ser a base física dos sistemas SMES, neste capítulo faz-se um breve estudo da supercondutividade, desde o seu aparecimento até os fenómenos macroscópicos fundamentais.

4. Sistema de armazenamento em bobinas supercondutoras (SMES):

No quarto capítulo, apresenta-se uma análise geral dos sistemas SMES e suas aplicações em toda a rede eléctrica.

5. Projecto de um Sistema SMES:

Seguidamente, são apresentados os formalismos matemáticos para o projecto do modelo a desenvolver.

6. Dimensionamento da Bobina Supercondutora:

No capítulo 6 é feito o dimensionamento da bobina, através de uma análise por elementos finitos, com o Flux2D®.

7. Implementação do Sistema SMES em Matlab/Simulink®:

Neste capítulo é simulado o modelo do sistema SMES em Matlab/Simulink®, para a falha pretendida e com a bobina dimensionada no capítulo anterior.

8. Conclusões e perspectivas futuras

No oitavo e último capítulo são apresentadas as conclusões finais sobre o trabalho desenvolvido nesta dissertação e propõe-se, como trabalho a realizar no futuro, a validação dos resultados obtidos num ambiente real.

¹ Do termo em inglês Low Temperature Superconductor

² Do termo em inglês High Temperature Superconductor

2 Revisão bibliográfica

2.1 Introdução

Nos últimos anos têm-se assistido a uma grande mudança no que diz respeito à tecnologia dos sistemas SMES, tanto em desenho como em potenciais aplicações. O aparecimento de materiais supercondutores de alta temperatura (HTS) teve grande responsabilidade nestas mudanças.

Este capítulo apresenta uma pequena análise da evolução dos sistemas SMES. Esta análise é feita em separado e em paralelo das duas tecnologias existentes dentro dos SMES: LTS SMES e HTS SMES.

2.2 Evolução dos SMES

A primeira proposta surgiu em 1969. O Francês M. Ferrier propôs a construção de uma bobina de grandes dimensões capaz de fornecer energia, de forma a compensar a variação da demanda de potência que se fazia sentir quando anoitecia em França. No entanto, o custo era demasiado elevado e a ideia não foi executada [3].

Depois desta proposta desencadearam-se vários estudos, tanto em formas e tamanhos de bobinas, como em sistemas criogénicos, até à electrónica de potência do sistema. Tais estudos levaram a novas propostas para as aplicações das SMES.

Tendo os SMES sido considerados, quase exclusivamente, como uma potencial solução para estabilidade na rede, os primeiros projectos foram unidades de grande escala aplicadas nas subestações de energia [4].

Em 1986 surgem os supercondutores de alta temperatura, embora por esta altura não tenham sido reconhecidos como uma potencial vantagem nas SMES. De facto, o primeiro projecto HTS SMES foi simplesmente mudar o supercondutor de baixa temperatura (LTS) pelo de alta temperatura, alterando o ambiente de hélio líquido para azoto líquido. Esta alteração apresentou alguns problemas na adaptação do material HTS, concluindo que não tinha grande vantagem [5]. Só depois de vários anos, com as diversas investigações sobre HTS SMES é que esta tecnologia foi possível, propícias para sistemas pequenas dimensões.

Segue-se, abaixo, uma análise bibliográfica em separado dos LTS SMES e dos HTS SMES.

2.2.1 LTS SMES

O primeiro sistema a ser instalado foi uma unidade de 30 MJ projectada pelo Los Alamos National Laboratory (LANL) em conjunto com a Bonneville Power Administration (BPA) [4].

O projecto teve início em 1972, e só foi instalada em 1979 na subestação de Tacoma, com um conversor de 10 MW para fornecer amortecimento a oscilações de baixa frequência da rede [6].

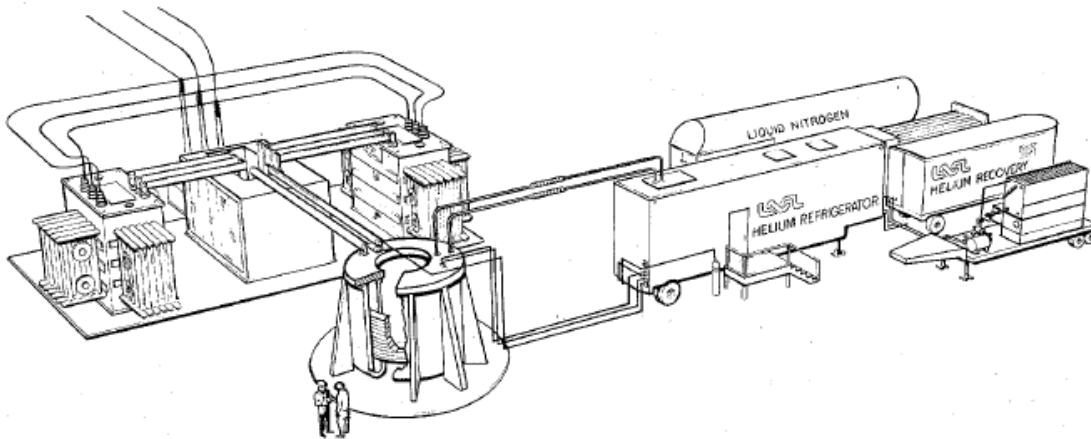


Figura 2.1. Sistema SMES de 30 MJ da Subestação de Tacoma [6].

Como resposta à bem sucedida instalação, iniciaram-se no Japão estudos sobre os SMES. Isto resultou na construção de algumas bobinas LTS solenoidais (25,6 kJ, 51,2 kJ e 100 kJ), pelo Central Research Institute of the Electric Power Industry (CRIEPI) e pelo National Laboratory for High Energy Physics (KEK). Estas bobinas eram arrefecidas a 4,2 K com hélio líquido e integradas com electrónica para avaliar o seu rendimento na estabilização da tensão num modelo de produção de energia [7,8].

Estes testes levaram a uma maior ambição energética, que foi levado com um estudo para um modelo LTS SMES de 5G Wh / 1000 MW, entre 1985 e 1987 [9].

Todos estes estudos provocaram a construção de um local de construção de SMES, e assim à sua comercialização [10]. No entanto, o tamanho e o custo eram ainda bastante restritos [9].

Depois destes projectos, vários outros programas de LTS SMES tiveram início em todo o mundo. Por exemplo, em 1991, a Kyosho Electric Power Co. finalizou a instalação de um LTS SMES de 36 MJ cuja finalidade era compensar as flutuações das cargas e controlar a tensão da rede [11,12]. Projecto este, que foi seguido pela construção de uma unidade de 20MJ pela

Accel Instruments, na Alemanha, no ano 2000. A bobina era solenoidal, pois já se tinha provado que para a mesma quantidade de fio este desenho conseguia uma energia de armazenamento maior que a bobina toroidal [13].

No mesmo ano, a companhia American Superconductor instalou seis unidades SMES na rede, em Wisconsin (Estados Unidos), para resolver problemas de instabilidade de tensão e depressões de tensão da rede. Cada unidade SMES tinha a capacidade de fornecer continuamente 2,8 MVar (5,6 MVar durante 1s). Poucos anos depois estes SMES foram desligados devido à instalação de uma linha de 345 kV cujos problemas de instabilidades não se faziam sentir [14].

O mais recente programa SMES é levado a cabo pelo Center for Advanced Power System (CAPS) em Florida, nos Estados Unidos, em parceria com o Electric Power Research Institute (EPRI). O dispositivo consiste num SMES de 100 MJ capaz de fornecer 50 MW de potência [15].

2.2.2 HTS SMES

Em 1986, apareceram os HTS, que inicialmente não foram aplicados para o desenvolvimento dos SMES. No entanto, o aumento da disponibilidade de fita HTS, durante a década de 1980, conduziu à investigação sobre se esta nova tecnologia poderia ser usada para reforçar o desenvolvimento de protótipos SMES.

Os primeiros desenhos incorporando fita HTS na bobina de armazenamento de energia foram destinados a substituir nos dispositivos equivalentes os LTS. O programa Japonês KEK de 5 GWh levou ao estudo de investigações sobre as vantagens de construir o dispositivo com HTS. No entanto, estes materiais eram relativamente novos concluindo-se que havia a necessidade destes evoluírem significativamente para se puderem tornar competitivos em projectos de SMES [5]

Em 1993, alguns estudos levaram a investigar o custo da eficácia dos dispositivos HTS SMES numa gama de 2 a 200MWh (4 a 400MW). O estudo abrangia o fabrico de condutores com base no Bismuto, com bobinas enroladas de forma toroidal e solenoidal [16,17].

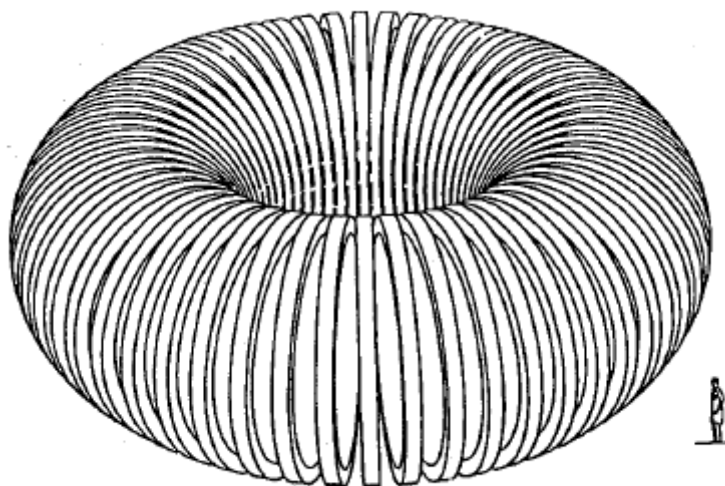


Figura 2.2. Bobina toroidal de 20 MWh à escala [16].

Concluiu-se então, que as bobinas HTS são apenas rentáveis para aplicações onde o campo magnético seja muito elevado e, em comparação com LTS SMES, só iria tornar-se competitiva com uma melhoria na densidade de corrente crítica (J_c) ou redução do custo de material [17].

No mesmo ano, um SMES de 1,4 MVA / 2,4 MJ foi instalado pelo Brookhaven National Laboratory, nos Estados Unidos, para oferecer alta qualidade de energia, protegendo de cavas e interrupções de tensão que se faziam sentir na rede [14].

Durante esse tempo, houve uma mudança de foco quanto à adequada aplicação de HTS SMES, o que levou ao desenvolvimento de dispositivos bastantes mais pequenos. Em 1991, Ise na Osaka University testou uma bobina HTS de 300 J arrefecida por azoto líquido para continuar o seu trabalho em “crio-electrónica” [18]. Este trabalho mostrou que se as perdas de comutação de carga e descarga da bobina fossem pequenas, em ambientes criogénicos, então as bobinas HTS poderiam ser vantajosas em aplicações de baixa potência.

O seguinte projecto significativo de um HTS SMES foi o protótipo dum dispositivo de 5 kJ construído pela American Superconductor Corporation (ASC), em 1997. A bobina foi arrefecida a 25 K para lhe permitir transportar até 100 A, enrolada de forma solenóide com fita BSCCO-2223³ e desenhada para operar a 200 V DC, com capacidade de carga de 0 até 100 A em dois segundos e de volta ao zero em dois segundos [19].

Em 1999, Friedman construiu uma nova prova deste conceito ao criar o dispositivo SMES com três duplas camadas de BSCCO-2223 com uma capacidade de armazenamento de 130 J.

³ BSCCO-2223, nome pelo que é conhecido o material $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_n\text{Cu}_{n+1}\text{O}_{2n+6-d}$ para a fase 2.

Este dispositivo foi testado numa gama de temperaturas de 52 a 77 K controlando a pressão do azoto líquido [20]. Friedman seguiu este trabalho, em 2003, construindo um SMES de 1,2 kJ utilizado para fornecer energia a uma carga DC de 400 V [21].

O desenvolvimento de HTS SMES foi levado para diferentes níveis de armazenamento de energia quando, em 2001, o Korean Electrotechnology Research Institute (KERI) publicou projectos de um dispositivo HTS SMES de 200 kJ. O desenho da bobina era em toróide, montada num crióstato, utilizando o azoto líquido para a sua refrigeração, com uma corrente de 200 A, e tensão de 1000 V [22, 23].

Vários outros projectos SMES estão apresentados na tabela 2.1, grande parte deles localizados na Europa [24].

País	Organização	Tipo	Especificações
Finlândia	Universidade de Tampere	HTS SMES	160 A / 200 V, 5 kJ
Finlândia	Universidade de Tampere	LTS SMES	275 A / 200V, 0,2 kJ
Alemanha	EUS GmbH	HTS SMES	100 A / 200 V, 8 kJ
Alemanha	ACCEL	HTS SMES	80 A / 400 V, 150 kJ
Alemanha	ACCEL	LTS SMES	1 kA / 400 V, 2 MJ
Alemanha	FZK Research Center	LTS SMES	2,5 kA / 6 kV, 0,22 MJ
Alemanha	FZK Research Center	LTS SMES	300 A / 700 V, 0,25 MJ
Alemanha	TU Munich	LTS SMES	1380 A / 3 kV, 1MJ
Itália	CESI	LTS SMES	1 MVA, 4 MJ
Espanha	ASINEL	LTS SMES	1 kA / 500 V, 1 MJ

Tabela 2.1. Projectos de SMES na Europa iniciados em 2001 (adaptado de [24]).

O maior destes é o projecto ACCEL na Alemanha. Em 2003, foi projectada uma bobina de BSCCO-2223 para 150 kJ enrolada em 20 duplas camadas utilizando 20 km de fita e arrefecida a 20 K, para ser ligado a um UPS⁴ [25].

Os mais recentes projectos foram iniciados em 2005: no Japão, o projecto duma unidade SMES de 10 MVA para compensar flutuações das cargas [14]; e na Austrália, pela Universidade de Wollongong, onde foi projectado uma unidade de 20 kJ utilizando fita BSCCO-2223, refrigerada a 20 K, para pequenas interrupções de tensão [25].

A evolução dos desenhos de SMES dividiu-se em dois caminhos diferentes. A LTS SMES tem sido identificada como uma tecnologia vantajosa nas instalações de alta potência

⁴ Do termo em inglês Uninterruptible Power Supply

(produção e transporte de energia) e a HTS tem sido marcadas como mais vantajosa em pequena e média potência (distribuição de energia).

2.3 Conclusão

A literatura vista apresenta a evolução das SMES, expondo de forma separada as duas tecnologias envolvidas. Esta revisão não faz o reconhecimento de todos os trabalhos publicados nesta área, no entanto apresenta algumas das publicações mais relevantes.

Ao longo da sua evolução foi possível perceber algumas diferenças destas, tanto a nível de desenho como de aplicação. Sendo as LTS SMES para problemas de estabilidade, pois são utilizados para grandes potências e as HTS SMES para problemas de potência menor. Pelo facto de serem mais pequenos e terem características para potências mais próximas do utilizador final, pode-se dizer que os HTS SMES são destinados para problemas relacionados com a qualidade da energia.

3 Supercondutividade

3.1 Introdução

Este capítulo dá ênfase à supercondutividade, pois este fenómeno é a base física dos SMES. São referidas as características básicas dos supercondutores e algumas diferenças entre os dois tipos descobertos.

É apresentada de uma forma sucinta a teoria BCS, pois esta é a teoria que explica o fenómeno físico, nos LTS, através de um modelo matemático.

3.2 Um pouco de história

Decorria o ano de 1911 quando o físico Heike Karmelinh-Onnes, no seu laboratório em Leiden, Holanda, descobriu o fenómeno da supercondutividade. Onnes pretendia estudar o comportamento dos materiais a baixa temperatura e mediu a condutividade eléctrica do mercúrio [26]. Nesta experiência usou hélio líquido para arrefecer os materiais, e inesperadamente verificou que a resistividade do mercúrio era muito baixa, tornando-se quase impossível medi-la. Esta transição de estado ocorreu à temperatura de 4,2 K.

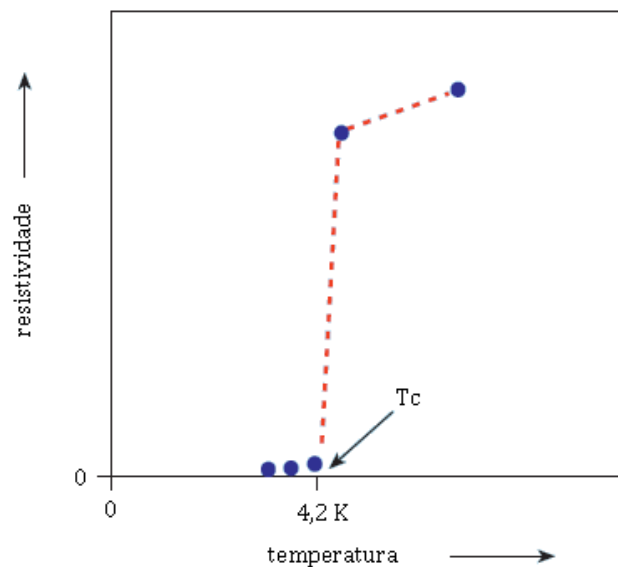


Figura 3.1. Curva da resistividade eléctrica do mercúrio [27].

Onnes investigou ainda vários materiais, como a platina, mas nenhum apresentava resistividade nula a baixas temperaturas. Na figura 3.1 está representado o comportamento da resistência do mercúrio em função da temperatura observando-se uma queda brusca da resistividade por volta dos 4,2 K [27]. Estava então descoberta a supercondutividade.

Em 1957, os físicos John Bardeen, Leon Cooper e John Schiffer, a trabalhar na Universidade de Illinois, construíram um modelo matemático que descrevia satisfatoriamente o fenómeno da supercondutividade, onde introduziram os chamados “pares de Cooper”, estes que serão explicados mais à frente [26].

Este trabalho ficou conhecido como a “teoria BCS”, em homenagem às iniciais dos seus nomes. Contudo, só passados quinze anos é que estes três físicos conseguiram comprovar a sua teoria, tendo sido distinguidos com o prémio Nobel da Física nesse mesmo ano de 1972 [26].

Até a década de 80, os materiais descobertos eram caracterizados pela baixa temperatura à qual se tornam supercondutores. Por tal facto, são designados por supercondutores de baixa temperatura [26].

Numa série de descobertas a partir da década de 80, surgiram novos materiais que se tornavam supercondutores a temperaturas muito mais elevadas. Em 1986, no Laboratório de Investigação da IBM, em Rüschlikon (Suíça), os investigadores Alex Müller e Georg Bednorz descobriram um composto cerâmico cuja temperatura de transição supercondutora jamais havia sido observada: 30 K (243 graus Celsius negativos). Assim, eles inauguravam a era dos supercondutores de alta temperatura. Um composto, tipo perovskite, formado pelos elementos químicos lantânio, bário, cobre e oxigénio - $(\text{La}_{2-x}\text{Ba}_x)\text{CuO}_4$ [26]. Por este trabalho foi-lhes atribuído o prémio Nobel da Física em 1987, o mais rápido a ser entregue após uma descoberta [26].

No mesmo ano, pela primeira vez na história da supercondutividade, Paul Chou, da Universidade de Huston, conseguia um composto cerâmico com temperatura crítica acima do nitrogénio líquido (77 K), abrindo enormes perspectivas para a aplicação desses materiais pois a refrigeração por azoto líquido é relativamente barata em comparação com o hélio líquido, elemento caro e pouco abundante [28].

Desde então, foram surgindo novos materiais, e os mais recentes são os materiais cerâmicos. Os materiais cerâmicos apresentam uma temperatura de transição acima dos 100 K. A grande vantagem destes novos materiais é o custo relativamente baixo de refrigeração. No entanto, são materiais muito mais quebradiços e difíceis de maquinar em comparação com os metais e ligas metálicas. Na figura 3.2, é apresentada a evolução dos materiais supercondutores.

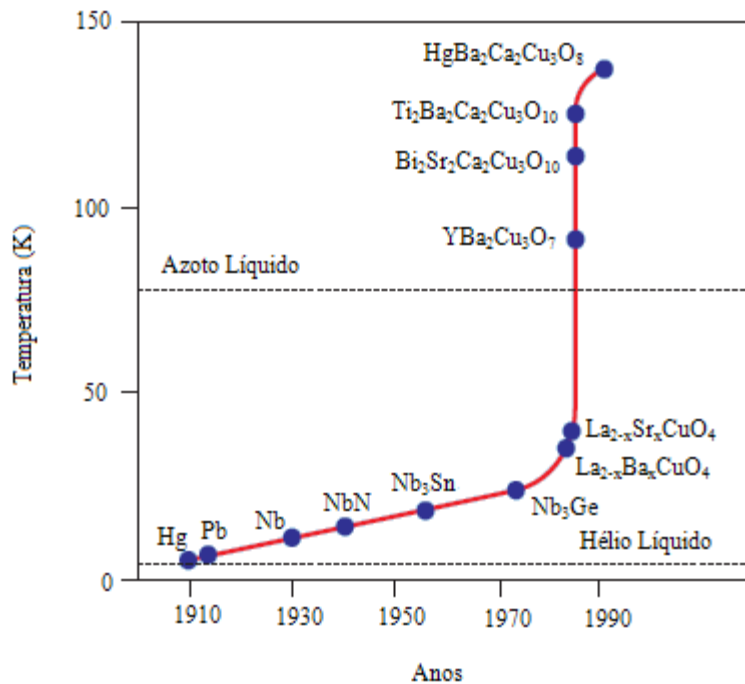


Figura 3.2. Evolução dos Supercondutores e respectivas temperaturas críticas [27].

3.3 O que é a supercondutividade?

A supercondutividade é um fenómeno observado em vários metais, materiais cerâmicos e outros compostos. Quando estes materiais são arrefecidos a temperaturas extremamente baixas, não apresentam resistência eléctrica. A temperatura à qual a resistência eléctrica é virtualmente nula é chamada de temperatura crítica, T_C , e varia de material para material, como se verifica na figura 3.2 [26].

Um supercondutor é caracterizado, exclusivamente, de três parâmetros: temperatura crítica, campo magnético crítico (H_C) e densidade de corrente crítica (J_C) [26]. Através destes três parâmetros define-se a *região de supercondutividade*, ilustrada na figura 3.3, apresentando estado de supercondutor quando dentro dela e estado normal quando fora.

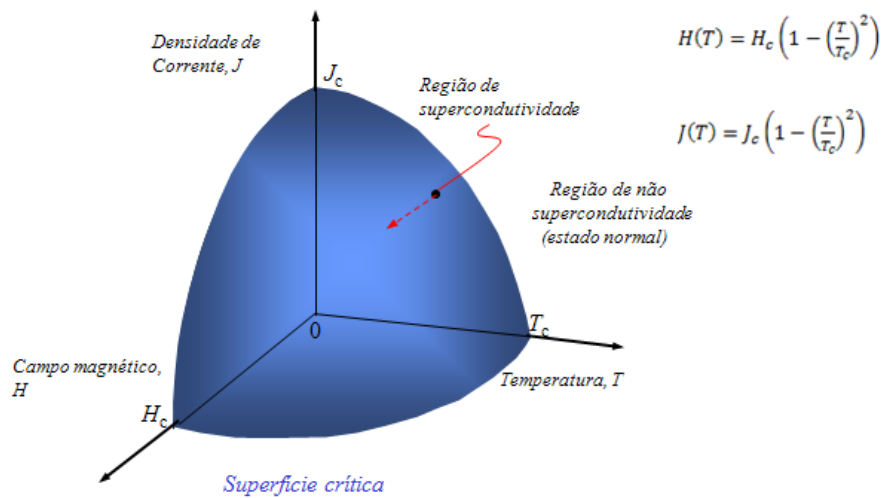


Figura 3.3. Superfície crítica de um supercondutor [26].

3.3.1 Supercondutores do Tipo I e do Tipo II

Os materiais supercondutores do tipo I, os primeiros a serem descobertos, são metais puros que necessitam de temperaturas extremamente baixas, abaixo dos 10 K. Outra das características destes materiais é não permitirem a penetração no seu interior por parte de campos magnéticos externos, funcionando como um diamagneto perfeito, o chamado efeito de Meisner [27].

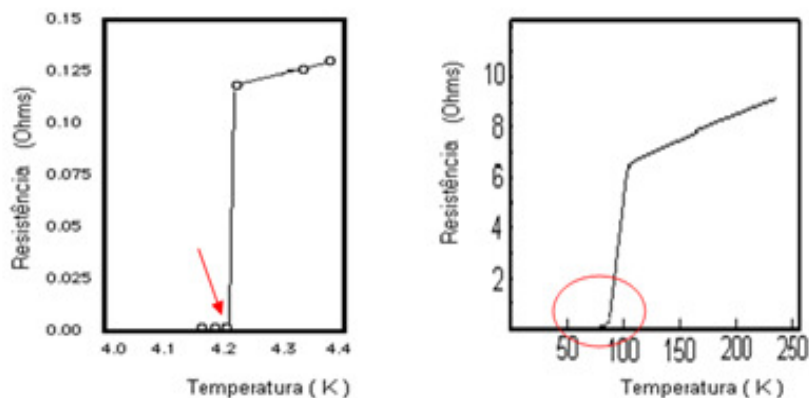


Figura 3.4. Curva de Resistividade de um Supercondutor tipo I, à esquerda, e tipo II à direita.

Os materiais do tipo II são essencialmente construídos por ligas metálicas e por materiais cerâmicos (HTS). Apresentam uma temperatura crítica mais elevada relativamente aos anteriores. Estes materiais possuem também um estado intermédio (estado misto ou vórtice),

entre o seu estado normal e o de supercondutor. Durante o estado misto estes materiais permitem algum tipo de penetração por parte de campos magnéticos externos, apresentando assim dois campos críticos, como se verifica na figura 3.5.

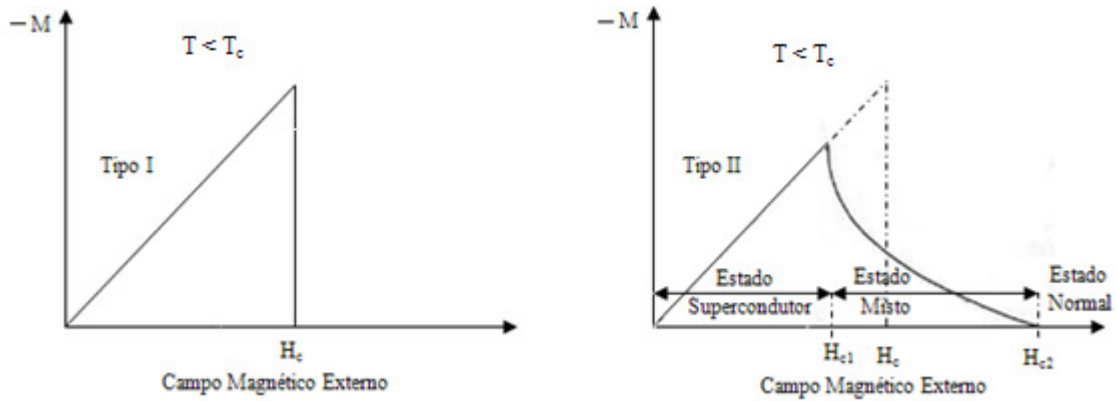


Figura 3.5. Curva de magnetização de um supercondutor: tipo I, à esquerda, e tipo II, à direita.

3.3.2 Teoria da supercondutividade: teoria BCS

A teoria de BCS é actualmente aceite como a melhor explicação para o fenómeno da supercondutividade nos LTS.

A organização atómica da maior parte dos materiais consiste numa estrutura cristalina na qual a intersecção de cada série de linhas perpendiculares é um átomo. Num condutor metálico, à temperatura normal, a corrente é conduzida por electrões que se movem através dessa estrutura cristalina [27].

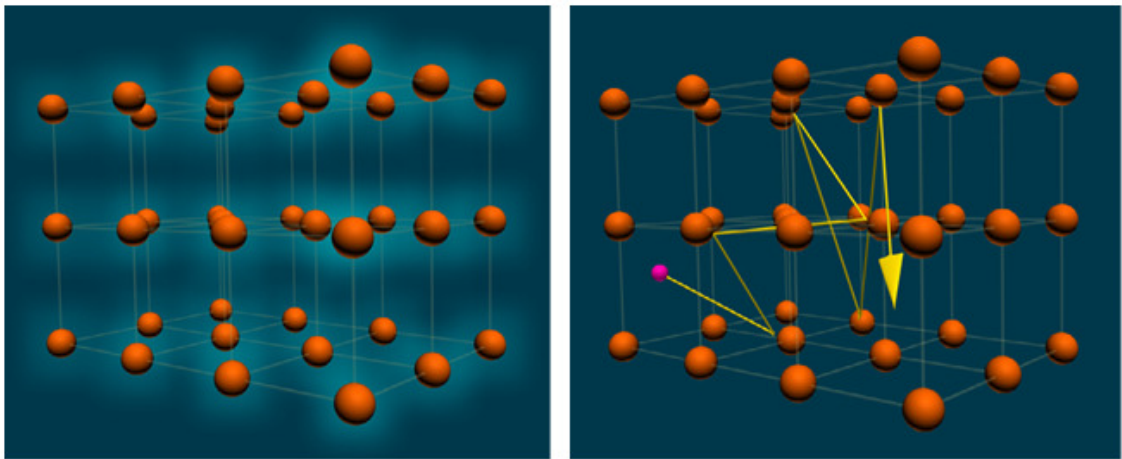


Figura 3.6. Rede cristalina, à esquerda. Rede cristalina com um electrão com movimentos aleatório [27].

O metal mantém os seus electrões livres, para que se possam mover livremente na estrutura, dando origem tanto à condução de calor como de electricidade. No entanto, a

repulsão electrostática entre eles (os electrões) inibe os seus movimentos, provocando colisões com os átomos, o que explica a resistividade eléctrica no metal [27].

A teoria BCS previa que dois electrões, a muito baixa temperatura, se atraíam e formavam um par, chamado de Cooper. Estes pares de electrões comportam-se como partículas individuais, mas possuem propriedades muito distintas das de um electrão sozinho [27], pois, normalmente, os electrões repelem-se mutuamente.

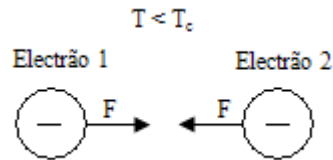


Figura 3.7. Par de Cooper.

Num supercondutor, os Pares de Cooper movem-se sem colisões por entre os átomos dando origem ao fenómeno da supercondutividade [27,28].



Figura 3.8. Movimento do Par de Cooper ao longo da rede cristalina.

Uma explicação cientificamente aceitável acerca da maneira como os electrões dos pares de Cooper se movem e permitem a supercondutividade envolve conceitos que extravasam o âmbito deste trabalho. Contudo, pode dizer-se, de forma algo primária, que a teoria BCS afirma que, à medida que um electrão passa através da rede, esta se deforma ligeiramente, no sentido dos electrões deixando no seu rasto uma pequena concentração de cargas positivas, maior do que a das vizinhanças. Se um segundo electrão estiver próximo naquele exacto momento, poderá ser atraído para esta região pela carga positiva, formando, então, um par com o primeiro electrão. A interacção entre os dois electrões ajuda-os a fluir sem resistência através do material supercondutor, ver figura 3.8 [27,28].

Os limites da supercondutividade ainda não foram alcançados, mas as teorias que explicam o comportamento dos supercondutores parecem estar sob constante revisão.

3.4 Conclusão

Os supercondutores possuem grandes vantagens relativamente aos condutores normais. O facto de a sua resistividade ser virtualmente nula permite-lhes transportar grandes quantidades de corrente, e por sua vez criar campos magnéticos poderosos.

Com o aparecimento dos HTS, houve uma maior facilidade de provocar este fenómeno, pois o azoto liquido é mais barato e mais abundante que o hélio, com o qual se arrefeciam os supercondutores.

Este facto provocou o aparecimento de mais e melhores aplicações na supercondutividade, sendo os SMES um exemplo claro desse acontecimento.

4 Sistema SMES

4.1 Introdução

Este capítulo estuda os sistemas SMES de uma forma geral, fazendo uma análise sintetizada de toda esta tecnologia.

Inicialmente é feita a classificação das unidades de armazenamento, seguindo-se uma análise da topologia básica do sistema SMES, onde se dá ênfase à bobina supercondutora.

Seguidamente são apresentados os principais nichos de aplicações dos SMES, tal como algumas das tecnologias que lhes fazem frente.

Posteriormente, são apresentadas, de forma separada, as principais perturbações na rede eléctrica, assim como uma breve descrição do funcionamento dos SMES para cada perturbação.

4.2 Classificação dos SMES

Como já foi referido os SMES são uma tecnologia baseada na capacidade que os supercondutores têm em conduzir grandes quantidades de correntes DC, com perdas resistivas desprezáveis, dando origem a campos magnéticos bastantes significativos e desta forma armazenando a energia [29]. Segundo [14, 29] a energia armazenada é escrita da seguinte forma:

$$W_{mag} = \frac{1}{2}LI^2 = \frac{1}{2\mu_0} \iiint_{\text{espaço}} B^2 dx dy dz \quad (4.1)$$

onde L é o coeficiente de auto indução da bobina, I a corrente no supercondutor, B a densidade de fluxo magnético criado pela corrente e μ_0 a permeabilidade magnética do ar.

O sistema SMES oferece recursos bastantes atractivos para determinadas aplicações na energia eléctrica. Características como rapidez de carga/descarga, grande capacidade e rendimento de armazenamento, grande densidade de potência, grande tempo de vida (medido pelo número de ciclos de carga/descarga) e reduzido impacto ambiental [1].

Assim, os SMES foram propostos em várias formas e tamanhos de maneira a poderem contribuir para um melhor desempenho da rede eléctrica.

Dependendo do sistema de armazenamento, as unidades SMES são, normalmente, classificadas pela sua capacidade de armazenamento de energia. A tabela 4.1 apresenta essa classificação:

Classificação	Capacidade de armazenamento (MJ)
SMES grande escala	$>10^7$
SMES media escala	10^4 - 10^6
Mini-SMES	10^2 - 10^4
Micro-SMES	<10

Tabela 4.1. Classificação das SMES (adaptado de [1]).

De notar, que de acordo com a classificação adoptada, praticamente todos os projectos estão na escala micro-SMES, sendo esta tabela apenas de carácter ilustrativo.

4.3 Topologia de um sistema SMES

Independentemente da sua aplicação, um sistema SMES é constituído por quatro partes fundamentais: a bobina supercondutora; o sistema de conversão de potência (SCP); o sistema de controlo; e o sistema de refrigeração [14, 29], como mostrado na figura 4.1.

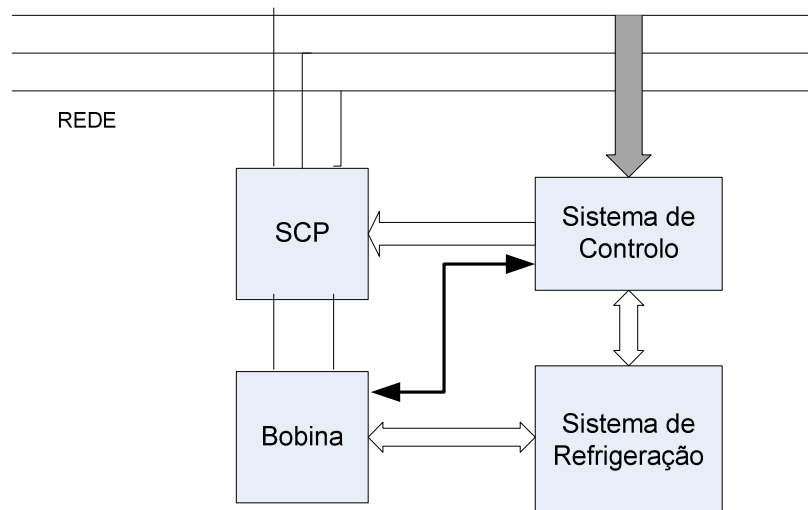


Figura 4.1. Esquema básico de um sistema SMES.

Seguidamente é descrita de forma sintetizada a função de cada bloco do sistema, com excepção da bobina supercondutora em que se faz uma análise um pouco mais pormenorizada.

4.3.1 Bobina supercondutora

A bobina supercondutora é o coração do sistema SMES. É a responsável pela criação do campo magnético, logo é a responsável pelo armazenamento da energia.

Existem, principalmente, duas topologias de bobina no que diz respeito à forma: toroidal e solenoidal, como ilustrado na figura 4.2.

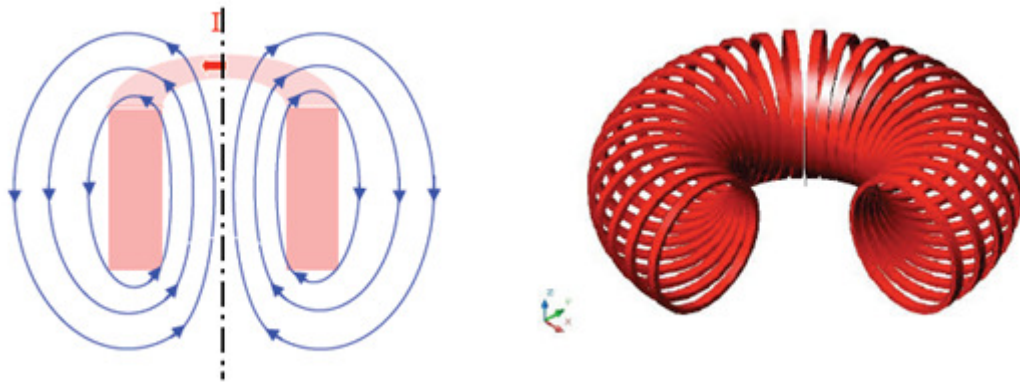


Figura 4.2. Formas das bobinas: Solenóide, à esquerda; Toróide, à direita.

Ao longo dos tempos vários estudos mostraram algumas diferenças para ambas as formas. Na tabela 4.2 estão descritas, de forma resumida, as principais vantagens e desvantagens de cada uma delas [30].

	Vantagens	Desvantagens
Solenoidal	Estrutura Simples, grande capacidade de armazenamento de energia por unidade de condutor.	Maior campo de dispersão, maiores dimensões.
Toroidal	Baixa dispersão, unidades com pequenas dimensões	Baixa capacidade de armazenamento de energia por unidade de condutor, estrutura mecânica mais complexa.

Tabela 4.2. Vantagens e desvantagens entre bobinas em forma solenóide e toróide.

Em ambas as formas é importante ter em conta algumas limitações mecânicas, pois a bobina supercondutora fica sujeita a grandes forças de Lorentz [14,30]. Caso estas não sejam tomadas em conta podem afectar o desempenho da bobina não tendo uma boa performance.

A densidade de fluxo limite da bobina pode ser dada pela energia por unidade de volume, equação 4.2, que se obtém através da equação 4.1.

$$\frac{W_{mag}}{Vol} \leq \frac{1}{2} \frac{B^2}{\mu_0} \quad (4.2)$$

No entanto, o verdadeiro limite de armazenamento de energia num SMES é mecânico. O Teorema do Virial [14] dá a relação entre o mínimo de massa da estrutura mecânica (externa), M_{min} , e a energia armazenada, W_{mag} . Para o caso de um solenóide a relação é dada por [14, 30]:

$$\frac{W_{mag}}{M_{min}} \leq \frac{\sigma}{d} \quad (4.3)$$

onde σ é a tensão mecânica e d a densidade da estrutura mecânica. A relação define o mínimo de massa da estrutura mecânica para uma pressão máxima de forma a suportar as forças electromagnéticas radiais [30], ilustradas na figura 4.3.

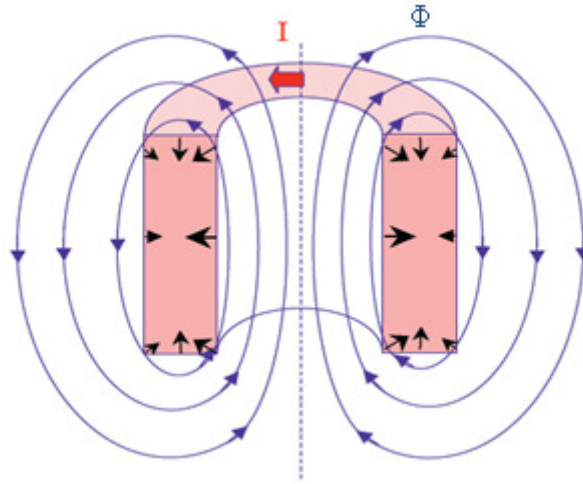


Figura 4.3. Forças electromagnéticas radiais (setas a preto), na bobina solenoidal.

4.3.2 Sistema de conversão de potência (SCP)

Sendo o sistema SMES uma aplicação que será, normalmente, ligado a uma rede eléctrica, corrente alternada, e sendo a bobina supercondutora um dispositivo de corrente contínua [29], é necessário um sistema de conversão de potência. Este sistema é a interface entre a bobina e a rede, através do qual a energia em corrente alternada pode ser convertida em energia em corrente contínua e assim poder ser armazenada na bobina. Inversamente, a energia em

corrente contínua armazenada na bobina poder ser convertida em energia em corrente alternada, que será entregue à rede.

4.3.3 Sistema de controlo

Se a bobina é o coração do sistema, o sistema de controlo é o cérebro. Este estabelece a ligação entre as necessidades da rede e o fluxo de potência, da rede para a bobina ou da bobina para a rede. O sistema recebe informação da rede eléctrica e do estado da bobina SMES. Também é o responsável por gerir o sistema de refrigeração [29].

4.3.4 Sistema de refrigeração

Este sistema é o responsável pelo arrefecimento da bobina e, desta forma, pela manutenção da temperatura de operação (inferior à temperatura crítica do material supercondutor utilizado).

4.4 Sistemas SMES aplicados nas redes eléctricas

No capítulo 2, verificou-se que a tecnologia SMES tem vindo a ser estudada e proposta de forma a ser útil em todos os segmentos da rede eléctrica: no segmento de produção, isto é, centrais eléctricas; nas linhas de transporte; no segmento de distribuição; e em consumidores finais [1].

Como se verifica na tabela 4.3, as aplicações do sistema SMES abrangem um leque muito vasto de capacidade de potência (de 1 a 10^3 MW) e requisitos de armazenamento (de 1 a 10^7 MJ, ou de fracções de um kWhora a milhares de MWhora), o que traz inúmeras possibilidades tanto a nível de estabilidade da rede como de qualidade de energia.

Aplicação	Potência (MW)	Armazenamento (MJ)	Tecnologia competitiva primária
Produção: potência de pico	>1000	$\sim 10^7$	Turbinas, Ar Comprimido
Produção: estabilidade; reserva girante	30 – 1000	2000 – 100000	Turbinas, Baterias
Transporte: estabilidade	30 – 1000	250 – 5000	FACTS ⁵ , Baterias
Armazenamento distribuído	1-20	25000-100000	Células de Combustíveis, Baterias
Distribuição: Qualidade de Potência	1-10	1-20	Baterias, Flywheels ⁶ , Geradores
Consumidores finais	~ 1	1-5	Baterias, Flywheels, Geradores, Condensadores

Tabela 4.3. Aplicações de SMES (adaptado de [1])

⁵ Do termo em inglês Flexible AC Transmission System

⁶ Volantes de Inércia

No entanto, esta tecnologia não é considerada, ainda, como uma tecnologia essencial nas redes de energia eléctrica. Para ser comercializada com sucesso, deve ser atractiva tanto economicamente como apresentar uma boa relação de custo/desempenho frente às tecnologias convencionais.

Por conseguinte, segue-se uma análise que apresenta os possíveis nichos de aplicações dos SMES nas redes eléctricas.

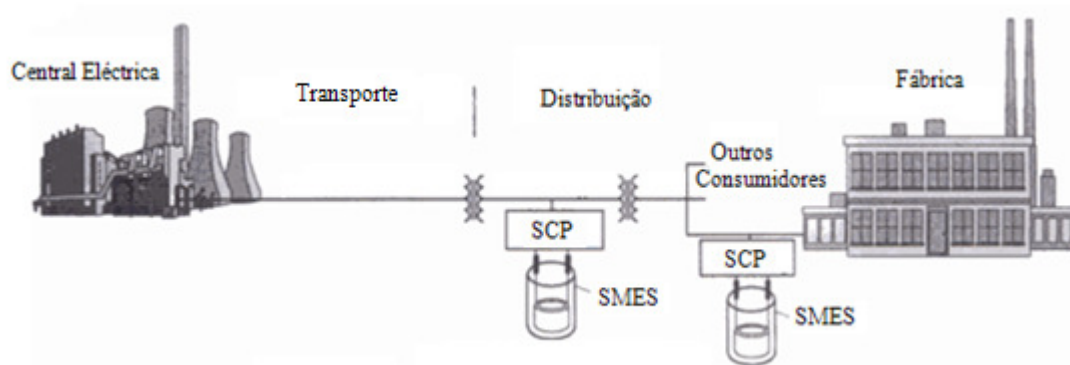


Figura 4.4. Exemplo dos segmentos da rede eléctrica, com unidades SMES no segmento de distribuição e consumidores finais (adaptado de [1]).

4.4.1 Segmento de produção

A nível de produção de energia eléctrica existem inúmeros problemas que afectam o desempenho das centrais geradoras. A inadequada capacidade de potência em picos de consumo, a necessidade de produção adicional para atender a variação de cargas, a necessidade de controlar melhor a transferência de energia e economizar potência para necessidades de pico de consumo, são os principais problemas que afectam o rendimento das centrais [1].

Face às turbinas hidroeléctricas e de combustão, a posição da tecnologia SMES é bastante pobre, pois as turbinas apresentam um baixo custo e menos riscos técnicos relativamente ao investimento nos SMES [1].

Como foi visto, a primeira proposta do sistema SMES foi para ser um dispositivo de nivelamento do consumo [1], embora não tenha prosseguido pelo seu elevado custo. Desta forma, os SMES não apareceram, neste segmento, para serem competitivos com as tecnologias convencionais, como bombas hidráulicas e armazenamento de energia em ar comprimido (CAES⁷), mas sim para serem atractivos em situações em que estas não possam ser utilizadas, devido às suas limitações [1].

⁷ Do termo em inglês Compressed Air Energy Storage

No segmento de produção, onde a tecnologia SMES pode apresentar-se economicamente viável, é no caso de produção adicional de energia, para atender à variação das cargas, por exemplo, a capacidade de responder mais eficientemente a mudanças instantâneas de carga fornecendo reserva girante e assim melhorando a margem de reserva [1]. As baterias químicas fazem frente aos SMES, neste problema, podendo ser mais vantajosa pelo simples facto de terem mais maturidade técnica, e pelo alto investimento inicial requerido pelos SMES [1].

4.4.2 Segmento de transporte

Nas linhas de transporte de energia os problemas mais evidentes estão relacionados com a insuficiente capacidade de transferências de energia, regulação e estabilização da tensão, e controlo de fluxo de potência [1]. Por exemplo, a necessidade de aumentar a capacidade de transferência de energia para acomodar o crescimento de carga pode ser inibida por questões de limitações de estabilidade na rede.

No segmento de transporte, a melhor oportunidade para a tecnologia SMES está relacionada com problemas de estabilidade [1]. Como já foi referido, o primeiro sistema SMES a ser construído foi para melhorar a estabilidade da linha de transporte, pois devido à instabilidade o fluxo de energia era limitado [1].

As soluções para problemas de estabilidade requerem um controlo dinâmico de grandes quantidades de potência. A tecnologia FACTS é bastante utilizada para este tipo de problemas. Assim, os SMES não surgem, aqui, para substituir esta tecnologia, mas sim para aumentar o seu rendimento. Visto, o SMES ser uma unidade de armazenamento de energia, compete, assim, directamente com as baterias químicas. Embora estas tenham baixo custo, o facto de apresentarem grandes dimensões em aplicações que requerem alta potência e relativamente baixa energia, fazem com que os SMES possam ser bastante atractivos [1].

4.4.3 Segmento de distribuição

Neste segmento os problemas apresentados são totalmente diferentes aos vistos anteriormente. Tanto no transporte como na produção os problemas mais frequentes são a nível de estabilidade e de capacidade de transferência de energia. No entanto, na distribuição, os problemas estão relacionados com qualidade e fiabilidade energética. Também existem

problemas de acréscimos de produção, no entanto, são melhor resolvidos por equipamentos de protecção, como limitadores de corrente (FCL⁸).

Alguns dispositivos de armazenamento como baterias químicas, volantes de inércia, supercondensadores e SMES são eficientes se destinados a perturbações de pequena duração (ordem dos segundos).

Existem inúmeras aplicações que exigem alta potência ($> 1 \text{ MW}$) várias vezes ao dia. Com estes “*duty cycle*”⁹, os custos das baterias aumentariam significativamente, bem como aumentariam os gastos de manutenção/substituição. Nestas condições, o sistema SMES pode vir a ser bastante atractivo economicamente [1].

Na figura 4.5 está ilustrada a relação potência/energia para os SMES (no que diz respeito ao segmento de distribuição) e algumas das tecnologias convencionais.

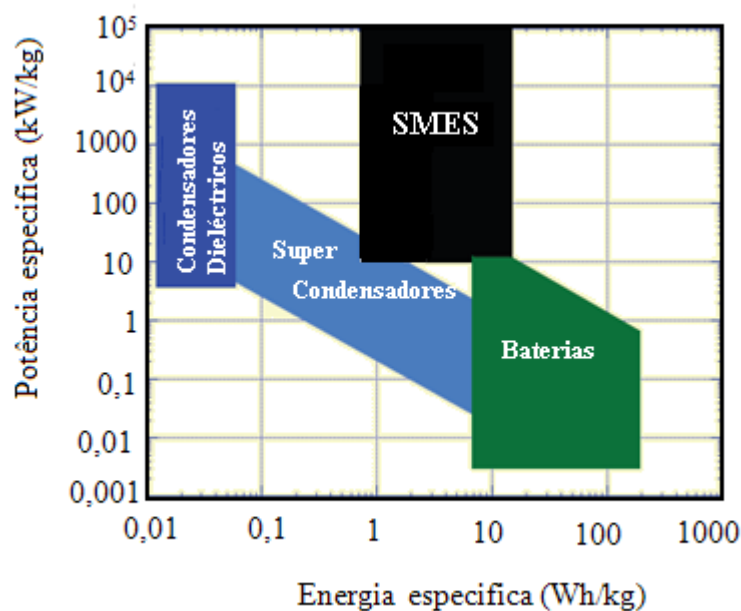


Figura 4.5. Relação potência/energia por unidade de massa, para os SMES, as baterias e os condensadores (adaptado de [14]).

Sintetizando um pouco, na figura 4.6 está ilustrado o gráfico de tempo de descarga versus capacidade de potência para algumas das tecnologias de armazenamento mencionadas.

⁸ Do termo em inglês Fault Current Limiter

⁹ Termo em Inglês utilizado em electrotecnia significando “ciclo de trabalho”

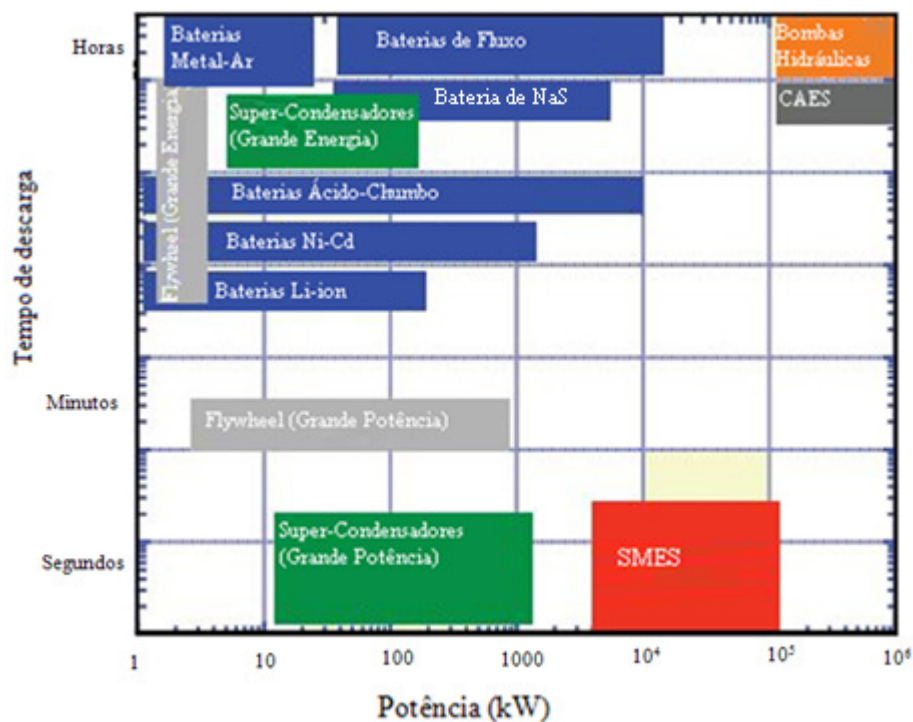


Figura 4.6. Tempo de descarga em função da potência para algumas tecnologias de armazenamento (adaptado de [14]).

Verifica-se que para grandes quantidades de potência e para tempos de descargas pequenos a tecnologia SMES apresenta características bastantes favoráveis sendo promissora para a resolução de alguns problemas que afectam as redes de energia eléctrica.

4.5 Soluções SMES

Mencionadas as tecnologias convencionais e analisadas as gamas de energia/potência para a qual os SMES são mais convenientes, segue-se uma análise mais detalhada dos problemas em si, estes que segundo [31], podem ser divididos em dois grupos: problemas de estabilidade e problemas de qualidade, como ilustrados na figura 4.7 [31].

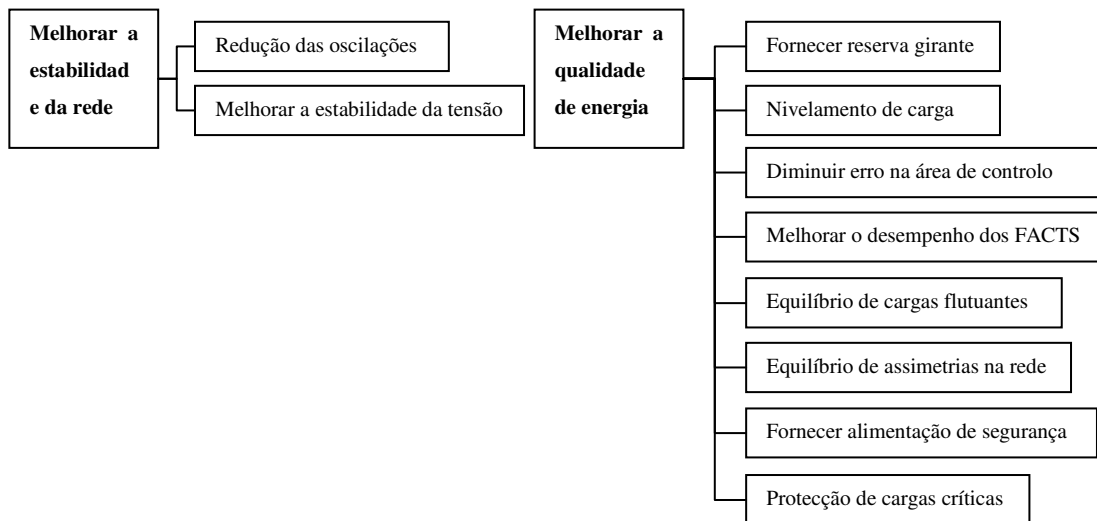


Figura 4.7. Resumo de aplicações da tecnologia SMES em redes de energia (adaptado de [31]).

4.5.1 Aplicações para melhorar a estabilidade na rede

Nesta secção é feita uma breve análise de cada problema de instabilidade, assim como a sua resolução pela aplicação do sistema SMES.

4.5.1.1 Redução das oscilações

As oscilações que se fazem sentir na rede são de baixa frequência (0,5 – 1Hz), que surgem na sequência da ocorrência de uma perturbação maior (falhas nas linhas de transporte, mudanças abruptadas de carga, perdas nas unidades de geração, etc).

O aparecimento destas oscilações, por vezes, limita a transferência de energia para prevenir o crescimento destas. Os SMES podem reduzir activamente estas oscilações através da modulação da potência (tanto activa como reactiva), podendo esta tecnologia ser mais eficiente do que outras convencionais, como já se verificou acima [31].

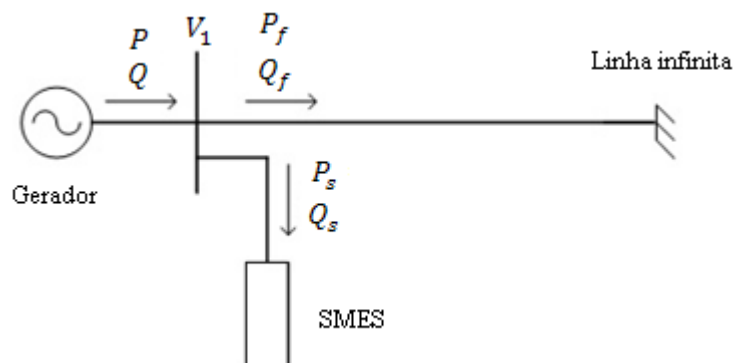


Figura 4.8. Topologia de sistema de transporte de energia com unidade SMES para reduzir oscilações [31].

A figura 4.8 ilustra o esquema do diagrama de um sistema de transmissão típico com uma unidade SMES para reduzir as oscilações. O SMES controla a potência activa, P_s , para anular as oscilações na velocidade angular, ω , do gerador, ou da potência, P_f , e controla a potência reactiva, Q_s , para suprimir as flutuações da tensão, V_1 , do barramento onde está ligada a unidade SMES. A potência activa e reactiva, P_s e Q_s podem ser determinadas pelas seguintes equações [31]:

$$P_s = G_\omega (\omega - \omega_{ref}) \quad (4.4)$$

$$P_s = G_p (P_f - P_{fref}) \quad (4.5)$$

$$Q_s = G_V (V_1 - V_{1ref}) \quad (4.6)$$

onde G_ω , G_p e G_V são os ganhos e ω_{ref} , P_{ref} e V_{1ref} são os valores de referência da velocidade angular, da potência e da tensão do barramento, respectivamente. Podendo P_s ser determinado tanto por (4.4) como por (4.5).

Em [31], são referidas vários projectos de sistemas SMES para redução das oscilações, verificando-se que apresentam melhorias consideráveis no transporte de energia eléctrica.

4.5.1.2 Melhorar a estabilidade da tensão

A instabilidade dinâmica de tensão produz-se quando acontece uma perda significativa de produção de energia ou não há potência reactiva dinâmica suficiente para manter as tensões nas linhas de transporte quando existe uma carga significativa. Um problema deste tipo vai provocar que a tensão decaia lentamente num período de tempo de 5 a 15 minutos (por vezes mais rápido) podendo provocar uma cava ou interrupção de tensão [31].

A tecnologia SMES, ao fornecer potência activa e reactiva, simultaneamente, de forma a anular a perturbação devido à perda de geração ou de transporte, é uma tecnologia eficiente para diminuir a instabilidade da tensão. Baseando-se na capacidade de armazenar energia, as SMES podem estabilizar o sistema tempo suficiente (5 a 15 minutos) de forma a permitir a reposição de geradores ou outras fontes de energia reactiva, evitando assim a instabilidade de tensão. Por outro lado, numa cava de tensão transitória com duração de 10-20 ciclos, que pode acontecer quando ocorre a existência de uma perturbação maior na rede, os SMES também são eficazes para fornecer suporte à tensão.

O esquema da figura 4.8, também serve para esquematizar esta situação. A potência reactiva, Q_s , pode ser controlada pelo uso do SMES em função da tensão V_1 , do barramento, tornando-a mais estável. A potência reactiva Q_s pode ser dada pela equação 4.6.

4.5.2 Aplicações para melhorar a qualidade da energia

Vistos os problemas e soluções SMES para problemas de instabilidade na rede segue-se agora uma análise para problemas relacionados com qualidade energética.

4.5.2.1 Fornecer reserva girante

Reserva girante é um termo que deriva do funcionamento das turbinas, sejam hidroeléctricas ou de combustão. As turbinas geradoras podem ser mantidas girando sem produzir energia, de forma a diminuir o tempo essencial para as colocar em serviço, quando necessário [33]. Assim, no caso da maior unidade de produção ser forçada a sair de serviço, um número de dispositivos de geração devem ser mantidos fora de serviço mas ligados, com reserva girante. Segundo [31], esta reserva girante tem de ser cerca de 7% da carga do sistema.

Pelo facto dos SMES terem uma capacidade significativa de armazenamento energético é possível que estes forneçam energia suficiente de forma a satisfazer o pedido de reserva girante, até que as turbinas sejam colocadas em serviço.

Fornecer reserva girante através dos SMES pode ser muito mais rentável do que com turbinas, devido a esta ser uma tecnologia praticamente sem perdas de armazenamento. Visto que, manter as turbinas em rotação apresenta perdas significativas e elevados custos de operação [31].

4.5.2.2 Nivelamento de carga

Como é sabido o consumo energético varia ao longo do dia. A energia com custo mais elevado é produzida sob condições de pico de carga [31]. O nivelamento de carga é implementado pelo armazenamento de energia no período onde não existem picos de consumo e posteriormente, quando o consumo máximo (pico de carga) acontecer, a libertação da energia armazenada irá fornecer energia necessária para suportar o pico. A primeira proposta de SMES surgiu com esta finalidade [3]. No entanto, não foi concretizada pelo seu elevado custo. Assim, para os SMES se apresentarem eficientes nesta questão tem que apresentar uma relação custo/rendimento bastante aceitável, podendo até vir a pôr de lado a aquisição de alguns geradores devido ao seu alto custo [31].

4.5.2.3 Diminuir o erro nas áreas de controlo

As áreas de controlo, existentes em centrais geradoras, fazem uma previsão da potência que devem depositar na rede e desta forma controlam a sua transferência de potência para a rede eléctrica [33]. Quando a potência é calculada entre áreas é importante que a potência instantânea da rede seja próxima da prevista [31]. Infelizmente, quando os geradores aumentam numa destas áreas e diminuem noutra, a carga do sistema pode mudar resultando um erro da potência real a ser entregue à rede, diminuindo o rendimento dos geradores. O sistema SMES pode ser projectado de forma a diminuir este erro, fazendo com que a potência prevista seja cumprida e assim assegurar um maior rendimento nos geradores.

Os SMES têm a capacidade tanto de fornecer energia como de receber, controlando o carregamento da bobina até uma corrente esperada. A variação na área de controlo é sentida e utilizada para controlar a tensão no SMES, U_{SMES} , através da mudança do ciclo de trabalho (“*duty cycle*”) dum talhador de tensão (“*chopper*”). Durante uma carga repentina na rede, o gerador não consegue acompanhar devido à sua inércia. Assim, o erro na área de controlo será negativo e o SMES descarregará. Segundo [31], o controlador deve ser considerado um circuito com atraso de 1ª ordem.

A variação de tensão na bobina, na transformada de Laplace, pode ser dada por:

$$\Delta U_{SMES} = \frac{G_0}{1 + sT_C} \quad (4.7)$$

onde G_0 é o ganho do controlo em malha fechada, s o operador de Laplace que representa d/dt e T_C é a constante de tempo do controlador.

A variação da corrente é dado por:

$$\Delta I_{SMES} = \frac{\Delta U_{SMES}}{sL} \quad (4.8)$$

onde L é o coeficiente de auto-indução da bobina supercondutora.

Desta forma, a variação da potência na bobina é escrita por:

$$\Delta P_{SMES} = (I_0 + \Delta I_{SMES})\Delta U_{SMES} \quad (4.9)$$

sendo I_0 a corrente inicial na bobina.

4.5.2.4 Melhorar o desempenho dos FACTS

O sistema SMES pode ser configurado para fornecer energia aos dispositivos de transmissão AC flexível, os FACTS. Os inversores de ambos os dispositivos, FACTS e SMES, são configurados de forma similar [31].

Os FACTS funcionam com energia da rede. Os SMES podem melhorar a sua performance fornecendo potência activa e reactiva. Um compensador estático síncrono (StatCom¹⁰) apenas pode absorver/injectar energia reactiva, e consequentemente, está limitado ao grau de liberdade e de acção suportado pela rede eléctrica. A adição de energia por parte das SMES permite que a StatCom injecte e/ou absorva potência activa e reactiva simultaneamente e, portanto, oferece benefícios adicionais e melhorias no sistema [31].

4.5.2.5 Equilíbrio de cargas flutuantes

Os SMES são dispositivos promissores para equilibrar flutuações de potência activa e reactiva de vários tipos de cargas, como fábricas, etc [31].

A figura 4.9 descreve um sistema típico com unidade SMES para compensar flutuações das cargas, localizadas perto do consumido final.

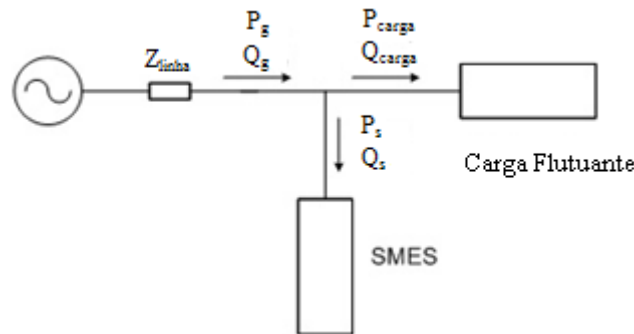


Figura 4.9. Topologia típica de um sistema de equilíbrio de carga flutuante com unidade SMES [31].

A potência activa, P_{carga} , e reactiva, Q_{carga} , da carga flutuante pode ser expressa da seguinte forma:

$$P_{carga} = P_c - \Delta P_f \quad (4.10)$$

$$Q_{carga} = Q_c - \Delta Q_f \quad (4.11)$$

¹⁰ Compensadores Estáticos

onde P_c e Q_c são as componentes constantes de potência activa e reactiva da carga, respectivamente, e ΔP_f e ΔQ_f as componentes de flutuação.

A fonte de alimentação apenas precisa fornecer as componentes constantes de potência da carga. O sistema SMES fornece, então, as componentes de flutuação, dadas por:

$$P_S = -\Delta P_f \quad (4.12)$$

$$Q_S = -\Delta Q_f \quad (4.13)$$

Sem esta compensação no sistema eléctrico, irão existir flutuações na linha de alimentação. No entanto, com o sistema SMES a componente de flutuação, de potência activa e reactiva, P_g e Q_g , respectivamente, do lado da fonte podem ser compensadas pela libertação ou absorção de energia pelo SMES.

4.5.2.6 Equilíbrio de assimetrias na rede

As assimetrias de tensão são muito comuns e inevitáveis no funcionamento da rede devido a falhas assimétricas, cargas monofásicas, cargas assimétricas, etc [31]. As tensões assimétricas aumentam as perdas nos transformadores e nas linhas de transmissão, diminuem a potência de saída dos transformadores, reduzem o rendimento dos motores, afectam o funcionamento de cargas críticas e até podem colocar em perigo a segurança dos equipamentos [31]. Além disso, as cargas não lineares e monofásicas causarão harmónicas e correntes assimétricas, que podem provocar mais perdas no sistema de distribuição e o funcionamento anormal de vários dispositivos [31]. Os sistemas SMES podem ser utilizados para equilibrar correntes e tensões assimétricas.

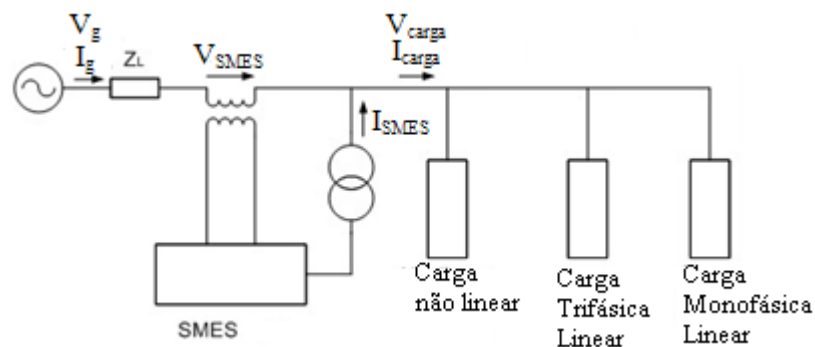


Figura 4.10. Configuração de um sistema SMES para equilibrar as assimetrias do sistema de energia [31].

Na figura 4.10 está ilustrada uma configuração típica dum sistema de compensação com unidade SMES. As harmónicas produzidas na corrente e tensão pelas cargas não lineares e a corrente e tensão desequilibrada como resultado da carga monofásica, são compensados pela corrente, I_{SMES} , e a tensão, V_{SMES} , respectivamente.

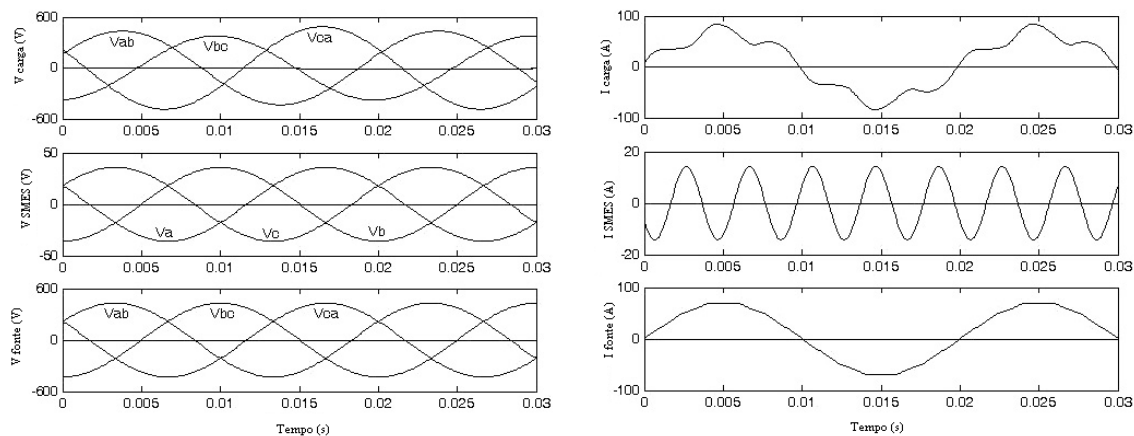


Figura 4.11. Formas de onda para um sistema equilibrado, à esquerda. Formas de onda, com unidade SMES para equilibrar o sistema devido a componentes harmónicas na carga [31].

Sob condições normais, figura 4.11 à esquerda, as tensões e correntes na carga são simétricas não sendo necessário qualquer tipo de fornecimento de energia por parte do SMES, pois, tanto a potência activa como reactiva são fornecidas pela fonte.

Em condições assimétricas, figura 4.11 à direita, as tensões e correntes não estão equilibradas e são não sinusoidais. O SMES fornece energia de forma a compensar as harmónicas ou assimetrias [31], como se verifica na figura 4.11 onde a corrente da carga tem uma forma não sinusoidal, mas com o fornecimento de energia por parte do SMES, a corrente na fonte é aproximadamente sinusoidal.

4.5.2.7 Fornecer alimentação de segurança

A capacidade de armazenamento de energia dos SMES pode ser utilizada como uma reserva de energia para um grande consumidor industrial em caso de perda da principal fonte de energia. O sistema SMES pode ser projectado de forma a ministrar energia quando necessária esta fonte de segurança [31].

4.5.2.8 Protecção de cargas críticas

O sistema SMES tem a capacidade de suavizar perturbações à saída do sistema de potência que por sua vez interrompem as cargas sensíveis dos consumidores. Quando ocorrem

perturbações momentâneas como, por exemplo, descargas atmosféricas, pode haver uma falha de energia, podendo haver uma cava ou até uma interrupção de tensão. Os SMES têm a capacidade de responder rapidamente, conseguindo injectar potência activa em menos de um ciclo de forma a proteger consumidores importantes da perda de energia e desta forma protegendo cargas críticas [31].

A figura 4.12 apresenta um breve resumo de tudo que foi referido neste capítulo, mostrando, novamente, que os SMES são direccionados para perturbações da ordem dos segundos (secção cinza da figura).

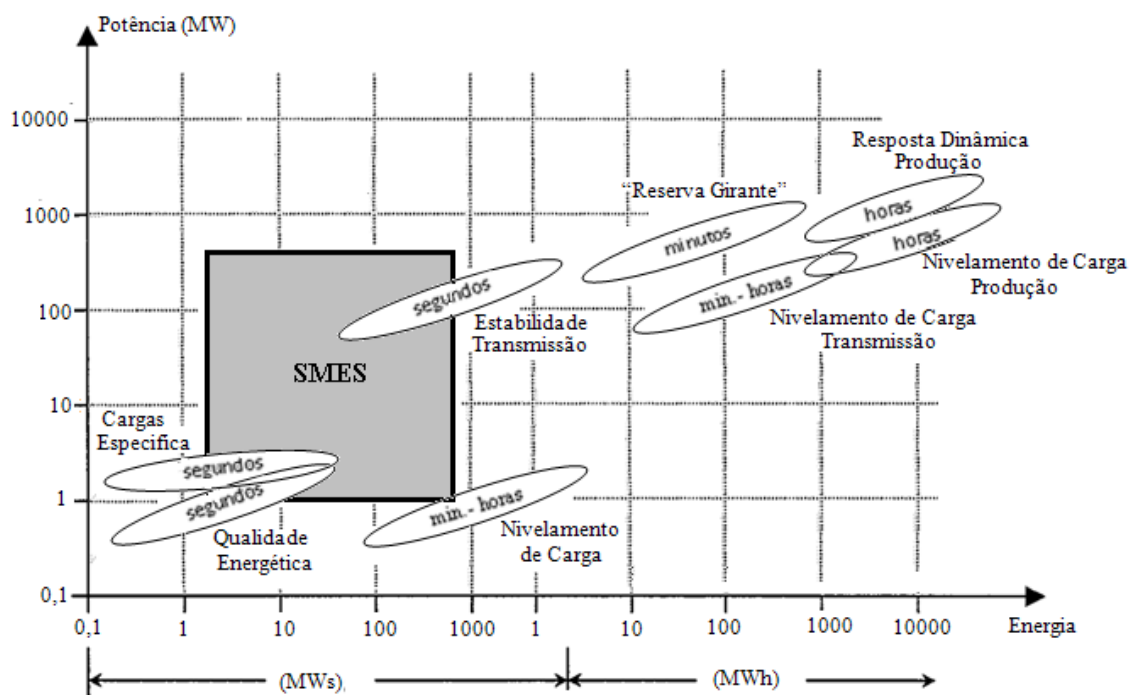


Figura 4.12. Características de potência/energia das potenciais aplicações SMES [32].

4.6 Conclusão

Neste capítulo foi feita uma análise geral dos sistemas SMES. Fez-se um breve estudo desta tecnologia frente às convencionais, verificando-se que esta pode ser promissora para grandes quantidades de potência e para tempos de descargas pequenos (figura 4.6).

Seguidamente fez-se um estudo resumido das aplicações dos SMES para alguns dos principais problemas da rede eléctrica, sejam estes problemas de qualidade ou de estabilidade. Verificando-se que as falhas do tipo cavas/interrupções de tensão são um dos principais problemas de qualidade de energia nas redes de distribuição, e desta forma, que os SMES podem ser uma solução eficaz para este problema.

5 Projecto de um sistema SMES

5.1 Introdução

Este capítulo apresenta os principais parâmetros de projecto de um sistema SMES, utilizado numa rede de distribuição, para protecção de cargas críticas devido à ocorrência duma perturbação denominada por *cava de tensão*.

Inicialmente é feita uma breve caracterização da falha para a qual o sistema vai ser projectado. Encontrados os parâmetros que definem a falha, estuda-se teoricamente o funcionamento de cada componente do sistema.

5.2 Identificação do problema

As cavas/interrupções de tensão são dos principais problemas nas redes de distribuição, provocando grandes prejuízos aos consumidores de energia [34]. Este tipo de falhas são as grandes responsáveis pelo mau funcionamento de algumas cargas, podendo até, danificar cargas consideradas sensíveis, como PLCs¹¹ e microprocessadores, que são de extrema importância, pois estes são os dispositivos responsáveis pelo controlo das grandes instalações industriais [1, 34].

5.2.1 Características da falha: *cava de tensão*

Genericamente, as cavas de tensão são caracterizadas por dois termos: a amplitude; e a duração da cava. A amplitude da falha é definida pelo decréscimo percentual de tensão eficaz, ΔV , e a duração dada pelo tempo que esta redução de tensão se faz sentir [34]. Na figura 5.1 está ilustrada a falha em estudo, verificando-se que a interrupção de tensão não é mais que um caso particular da cava de tensão: $\Delta V = 100\%$, ver figura 5.1 à direita.

¹¹ Do termo em inglês Programmable Logic Controller

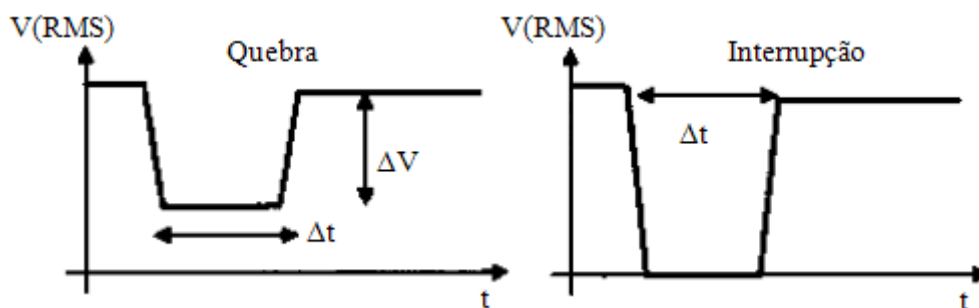


Figura 5.1. Cava/interrupção de tensão de tensão (adaptado [34]).

5.3 Princípio de funcionamento do sistema SMES

Analisada a anomalia a resolver, procede-se ao dimensionamento do sistema conforme esta. Para tal é necessário estudar o funcionamento de cada bloco do sistema, tendo em conta alguns dos seus parâmetros. Como referido anteriormente, os blocos são: a bobina supercondutora; o SCP; o sistema de controlo; e o sistema de refrigeração.

Segue-se uma análise para cada um deles, com exceção do sistema de refrigeração.

5.3.1 Bobina Supercondutora

Como já foi referido, o conceito SMES é baseado na capacidade que os supercondutores têm de armazenar grandes quantidades de energia, no campo magnético produzido pela corrente que circula na bobina supercondutora. Para simplificar o problema pode-se considerar a bobina supercondutora como uma indutância ideal, isto é, sem componente resistiva, logo sem perdas por efeito de Joule.

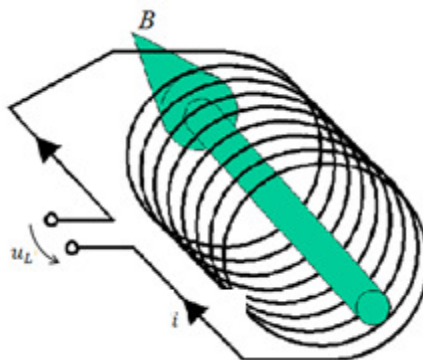


Figura 5.2. Exemplo de uma bobina.

A tensão aos terminais da bobina, u_L , é dada por:

$$u_L(t) = L \cdot \frac{di(t)}{dt} \quad (5.1)$$

onde L representa o coeficiente de auto-indução da bobina e i a corrente que a percorre.

Pelo facto de não ter perdas de Joules a potência na bobina é escrita por:

$$p(t) = L \cdot \frac{di(t)}{dt} \cdot i(t) \quad (5.2)$$

Por sua vez, a potência pode ser escrita pela variação de energia durante um intervalo de tempo, equação 5.3.

$$P = \frac{\Delta W}{\Delta t} \quad (5.3)$$

Integrando (5.3) e substituindo (5.2), obtêm-se a equação da energia da bobina em função da corrente, que já tinha sido apresentada no capítulo 4.

$$W(t) = \frac{1}{2} \cdot L \cdot i^2(t) \quad (5.4)$$

Está encontrado então o principal parâmetro do sistema SMES.

Ao longo do seu funcionamento, a bobina supercondutora terá dois modos de funcionamento básicos: o modo de carga, para armazenar a energia; e o modo de descarga, onde irá depositar a energia nela armazenada. Segue-se, então, uma análise para cada um dos modos.

5.3.1.1 Modo de descarga

A máxima quantidade de energia armazenada na bobina acontece quando nela circula a corrente máxima estipulada. Desta forma, a máxima energia armazenada (equação 5.5) pode ser dada pela equação 5.4, para a corrente máxima, I_{max} .

$$W_{max} = \frac{1}{2} \cdot L \cdot I_{max}^2 \quad (5.5)$$

Admitindo que a bobina fornece uma potência constante, P_{forn} , durante um determinado tempo, a energia de descarga pode ser escrita pelo decréscimo, ao longo do tempo, da energia máxima, equação 5.6 [1].

$$W(t) = W_{max} - P_{forn} \cdot t = \frac{1}{2} \cdot L \cdot I_{max}^2 - P_{forn} \cdot t \quad (5.6)$$

Este decréscimo de energia não irá além de um determinado valor de energia, definido aqui pelo valor mínimo de energia, W_{min} , que acontece quando a corrente fornecida pela bobina tem valor mínimo. Esta tem que ter a capacidade de fornecer a potência necessária, P_{forn} . Desta forma a corrente não pode ser inferior à corrente mínima dada por [1]:

$$I_{min} = \frac{P_{forn}}{u} \quad (5.7)$$

onde u representa a tensão aos terminais da bobina. Pelo facto de se tratar de intervalos de tempo muito pequenos (ordens dos milissegundos) a tensão na bobina pode ser considerada aproximadamente constante, aparecendo assim:

$$I_{min} = \frac{P_{forn}}{U} \quad (5.8)$$

onde U representa a tensão continua aos terminais da bobina.

Este valor corresponde a uma energia:

$$W_{min} = \frac{1}{2} \cdot L \cdot I_{min}^2 = \frac{1}{2} \cdot L \cdot \left(\frac{P_{forn}}{U} \right)^2 \quad (5.9)$$

Certamente, que a descarga poderá continuar para valores inferiores a estes, até a descarga total da bobina. No entanto, será a uma potência bastante mais reduzida [1]. Por este facto, a bobina tem apenas a capacidade de fornecer P_{forn} num certo período de tempo, aqui denominado, tempo de protecção, t_{prot} , equação 5.9.

$$t_{prot} = \frac{W_{max} - W_{min}}{P_{forn}} \quad (5.10)$$

Este tempo define, assim, a máxima energia transferida em condições nominais. Desta forma aparece o parâmetro, definido por *débito de energia*, ε , equação 5.10, dado pela relação entre a máxima energia transferida, W_{forn} e a máxima energia armazenada [1, 31].

$$\varepsilon = \frac{W_{forn}}{W_{max}} = \frac{P_{forn} \cdot t_{prot}}{W_{max}} \quad (5.11)$$

Segundo [1, 31], o coeficiente de auto-indução, L , e a corrente nominal, isto é, I_{max} , podem ser escritos através das equações 5.4 e 5.7, respectivamente:

$$L = \frac{2 \cdot U^2 \cdot t_{prot}}{P_{forn}} \cdot \left(\frac{1 - \varepsilon}{\varepsilon} \right) \quad (5.12)$$

$$I_{max} = \frac{P_{forn}}{U \cdot \sqrt{1 - \varepsilon}} \quad (5.13)$$

Ficando assim definido o coeficiente de auto-indução e a corrente máxima nominal em função do *débito de energia*, com U e P_{forn} parâmetros definidos previamente.

Falta, então, encontrar a progressão da corrente, que pode ser dada pelas equações 5.4, 5.6 e 5.11 [1]:

$$i(t) = \frac{P_{forn}}{U \cdot \sqrt{1 - \varepsilon}} \sqrt{1 - \varepsilon \frac{t}{t_{prot}}} \quad (5.14)$$

As figuras 5.3 e 5.4 mostram o andamento da corrente e da energia, respectivamente, para o estado de descarga da bobina, ao longo do tempo em função de *débito de energia*.

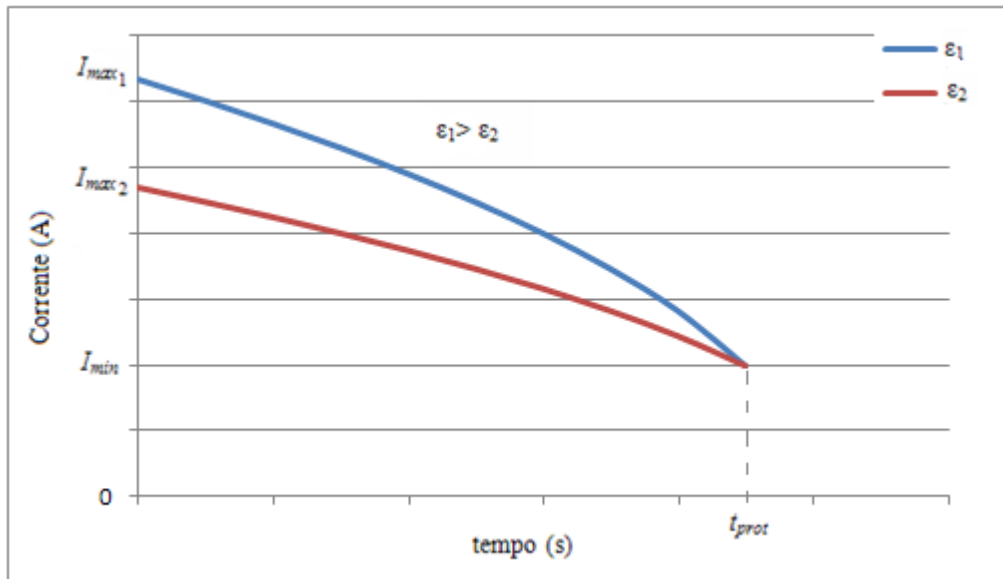


Figura 5.3. Evolução da corrente de descarga para diferentes ε .

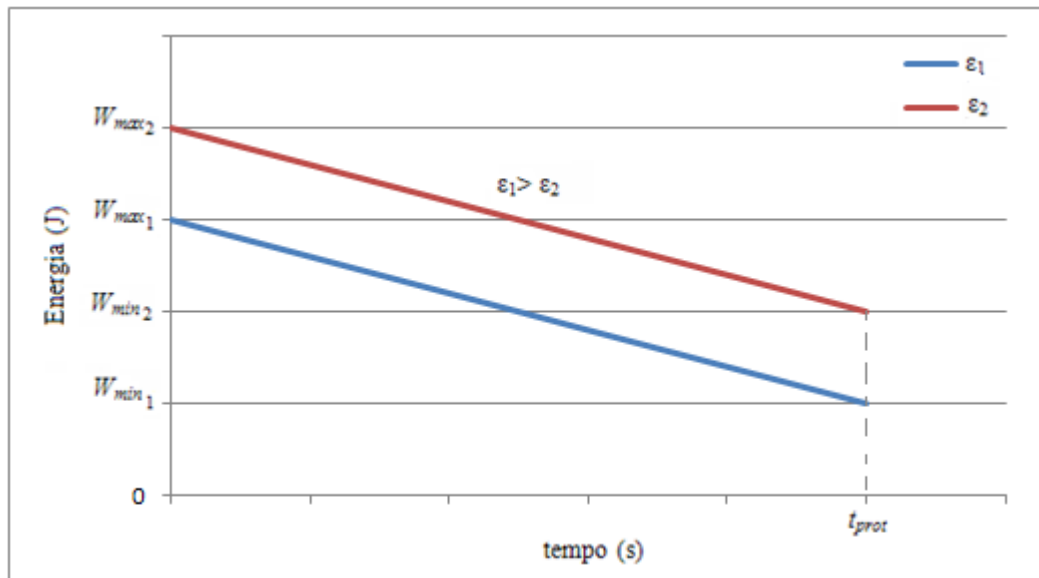


Figura 5.4. Evolução da energia de descarga para diferentes ε .

5.3.1.2 Modo de carga

Ao colocar uma tensão aos terminais da bobina, cria-se uma corrente na bobina que evolui até se alcançar a corrente máxima.

O carregamento da bobina pode ser encontrado a partir da equação 5.1:

$$i(t) = \frac{1}{L} \cdot \int u_L(t) dt \quad (5.15)$$

Assumindo uma tensão DC nos terminais da bobina, aparece a equação de carga da bobina, equação 5.15, correspondendo I_0 à corrente inicial da bobina.

$$i(t) = \frac{1}{L} \cdot U_{DC} \cdot t + I_0 \quad (5.16)$$

A evolução da corrente de carga, ao longo do tempo, é dada pela equação duma recta, como se verifica na equação 5.15, até alcançar a corrente máxima. O tempo até atingir a corrente máxima, denomina-se por tempo de carga, t_{carg} , equação 5.16. O tempo máximo de carga da bobina, $\{t_{carg}\}_{max}$, consiste no tempo que a bobina demora a atingir o valor máximo de corrente, I_{max} , encontrando-se inicialmente descarregada, isto é, $I_0 = 0$.

$$t_{carg} = \frac{L \cdot (I_{max} - I_{min})}{U_{DC}} \quad (5.17)$$

$$\{t_{carg}\}_{max} = \frac{L \cdot I_{max}}{U_{DC}} \quad (5.18)$$

Em condições nominais de funcionamento, esta situação só acontece uma vez. A partir da primeira carga completa da bobina, esta nunca descarregará por completo, mantendo sempre a corrente mínima.

A corrente provoca o aparecimento de um campo magnético, no qual é armazenada a energia (magnética), cuja evolução, ao longo do tempo, é dada pela forma quadrática apresentada na equação 5.18:

$$W(t) = \frac{1}{2} \cdot \frac{U_{DC}^2}{L} \cdot t^2 \quad (5.19)$$

Na figura 5.5 está ilustrada a evolução da corrente e energia magnética durante a carga da bobina.

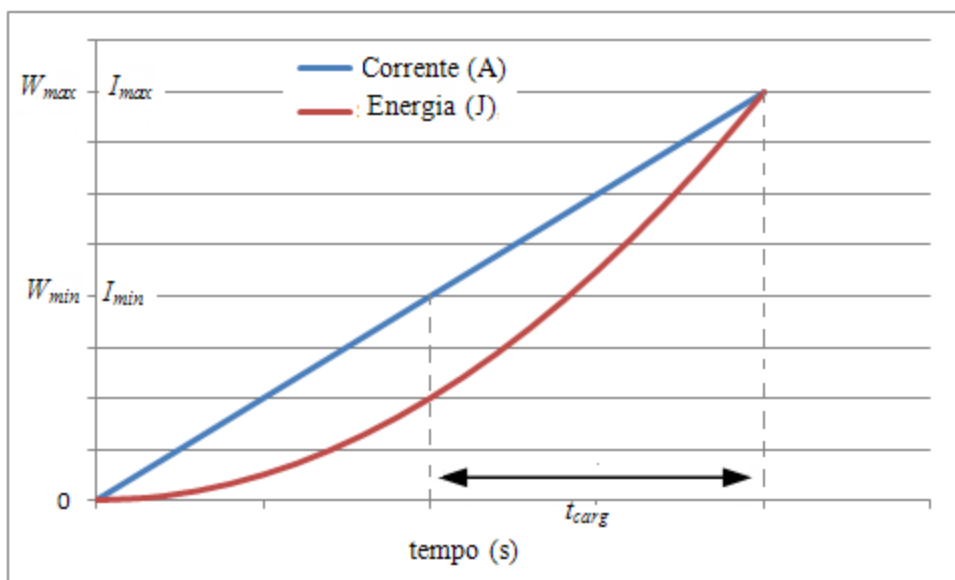


Figura 5.5. Evolução da corrente e da energia no modo de carga.

5.3.2 Sistema de conversão de potência

O sistema de conversão de potência consiste em dois conversores de potência: um “*chopper*”; e um conversor AC/DC bidireccional.

A bobina supercondutora é inserida no “*chopper*” para poder ser controlada, sendo esta unidade um dispositivo DC. No entanto, é aplicado numa rede AC e por este facto é necessário a utilização do conversor AC/DC bidireccional para, assim, estabelecer interface entre a rede e o “*chopper*”.

Segue-se uma análise pormenorizada para ambos os conversores.

5.3.2.1 “Chopper” com a bobina

O “*chopper*”, em estudo, é de dois quadrantes [38], e utiliza dispositivos de comutação forçada, IGBTs, permitindo operar no 1º e 4º quadrante, limitando a corrente a ser sempre positiva. Com o procedimento de comando deste conversor pretende-se que S1 e S2, ilustrados na figura 5.6, alternem entre si no estado de fecho e de abertura, durante intervalos de tempo bem definidos.

É um componente de extrema importância no sistema. Para além de ser a responsável pela carga e descarga da bobina, também mantém o nível de tensão na ligação DC (vista mais a frente) para a carga.

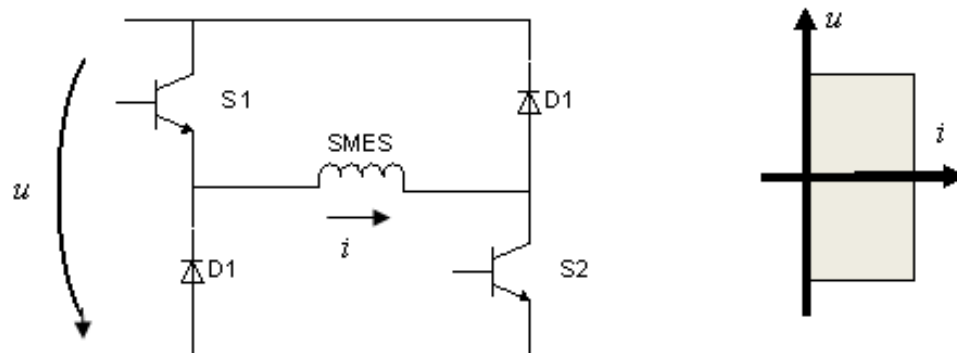


Figura 5.6. Conversor “chopper” com bobina e quadrantes de funcionamento do conversor.

Analisando a figura 5.6, é possível verificar que o “chopper” é o responsável por controlar a corrente na bobina supercondutora, apresentando dois modos de operação: o modo de descarga; e o modo de carga e persistente.

5.3.2.1.1 Modo de descarga

A descarga da bobina acontece ao abrir ambos os transístores, fazendo com que a corrente armazenada na bobina flua para os terminais do “chopper”, como ilustrado na figura 5.7.

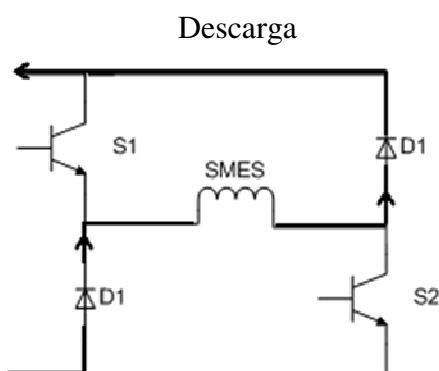


Figura 5.7. Sentido da corrente no modo de descarga.

Este modo estará activo enquanto houver falha no sistema, que é equivalente ao tempo de descarga da bobina, e não será superior ao tempo de protecção, equação 5.10.

5.3.2.1.2 Modo de carga e persistente

Para carregar a bobina ambos os transístores estarão fechados até a corrente atingir o valor máximo definido, I_{max} . Chegado a esse valor, a bobina não tem capacidade de armazenar mais energia, sendo necessário desligar um dos transístores, por exemplo, o transístor S1 abre, ficando apenas o S2 fechado, e desta forma, passando para o estado persistente, como se verifica na figura 5.8.

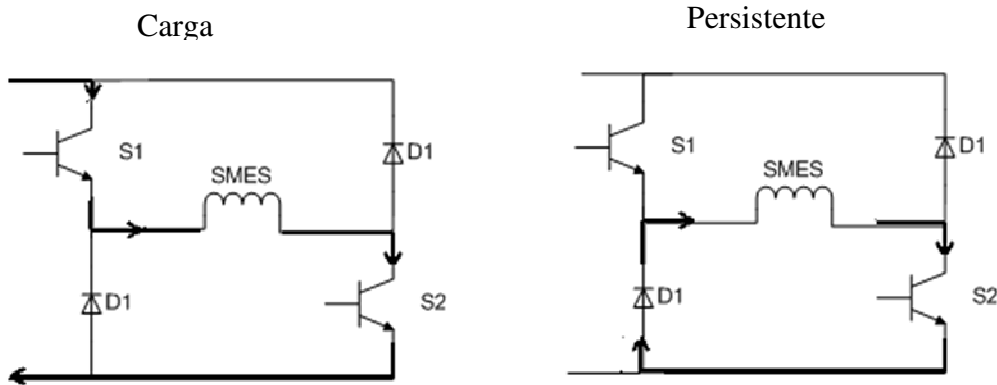


Figura 5.8. Sentido da corrente para o modo de carga (à esquerda) e para o modo persistente (à direita).

Naturalmente, que no estado persistente haverá um pequeno decaimento de corrente ao longo do tempo, pois existem pequenas perdas resistivas, tanto no díodo, D_1 , como no transístor, S_2 . No entanto estas perdas são bastante pequenas face aos valores de potências aqui tratadas.

Os transístores estão fechados apenas no intervalo de tempo definido acima por tempo de carga, t_{carg} (nota que para o primeiro carregamento da bobina o tempo será o tempo de carga máximo, $\{t_{carg}\}_{max}$, como referido anteriormente). O tempo do modo persistente é apresentado na equação 5.19, onde P_d representa a potência dissipada no transístor e no díodo, e V_{D1} e V_{S2} representando as quedas de tensão no díodo D_1 e no transístor S_2 , respectivamente.

$$t_p = \frac{W_{max} - W_{min}}{P_d} \quad (5.20)$$

$$P_d = I \cdot (V_{D1} + V_{S2}) \quad (5.21)$$

Na figura 5.9 é visível a forma de onda da corrente e da energia na bobina durante o funcionamento nominal, sem aparecer o instante inicial em que a bobina está totalmente descarregada.

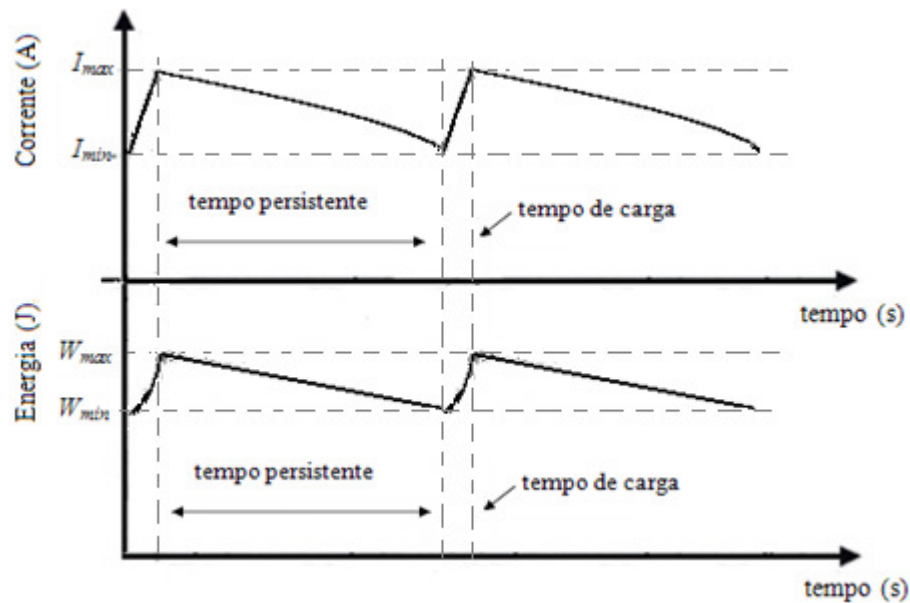


Figura 5.9. Evolução da corrente e energia para o funcionamento nominal.

5.3.2.2 Conversor AC/DC bidireccional

O conversor em ponte apresentado, na figura 5.10, utiliza dispositivos de comutação forçada, IGBTs, e tem a capacidade de funcionar como inversor e como retificador, desde que as condições de fronteira no lado contínuo (DC) e no lado alternado (AC) sejam cumpridas [38, 39].

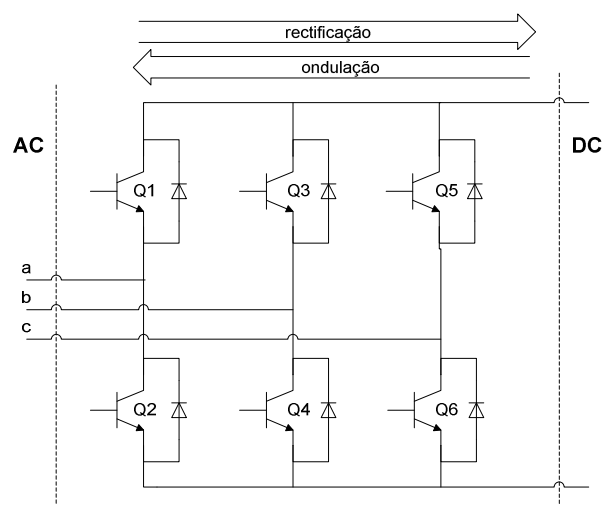


Figura 5.10. Conversor AC/DC bidireccional.

O conversor AC/DC terá dois modos de operação, daí o facto de ser bidireccional. Segue-se uma análise para ambos os modos, que para o caso deste conversor não será mais que o modo de inversão e de rectificação.

5.3.2.2.1 Modo de inversão

Quando existe falha na rede é necessária a reposição de energia na linha. Nesta situação, é imposta uma tensão contínua no lado DC do conversor bidireccional, que será transformada em AC através do controlo dos IGBTs, funcionando, assim, como inversor.

O comando deste conversor controlado por tensão deve ser feito de tal forma que apenas um dos transístores em cada braço esteja a conduzir, evitando o curto-circuito. Com o mínimo de seis manobras por período é possível gerar um sistema trifásico de tensões AC rectangulares, ilustrado na figura 5.11.

Uma vez que a jusante do conversor AC/DC tem-se um circuito indutivo (do filtro), visa-se a obtenção de correntes praticamente sinusoidais a partir do referido sistema de tensões [38].

O controlo dos IGBTs é feito através da modulação por largura de pulso¹². As técnicas de comando por PWM consistem no estabelecimento de uma maior quantidade de comutações, numa sequência tal que gere tensões convertidas. Estas tensões possuem a componente fundamental e harmónicas de ordem elevada que serão filtradas pelo filtro.

As técnicas de comando PWM podem ser distinguidas em duas classes: padrão global pré-calculado e modelação por sub-harmónica [38]. Uma vez que a técnica PWM adoptada foi a segunda, não se descreverá a técnica de padrão global pré-calculado.

¹² Do termo em Inglês Pulse Width Modulation (PWM)

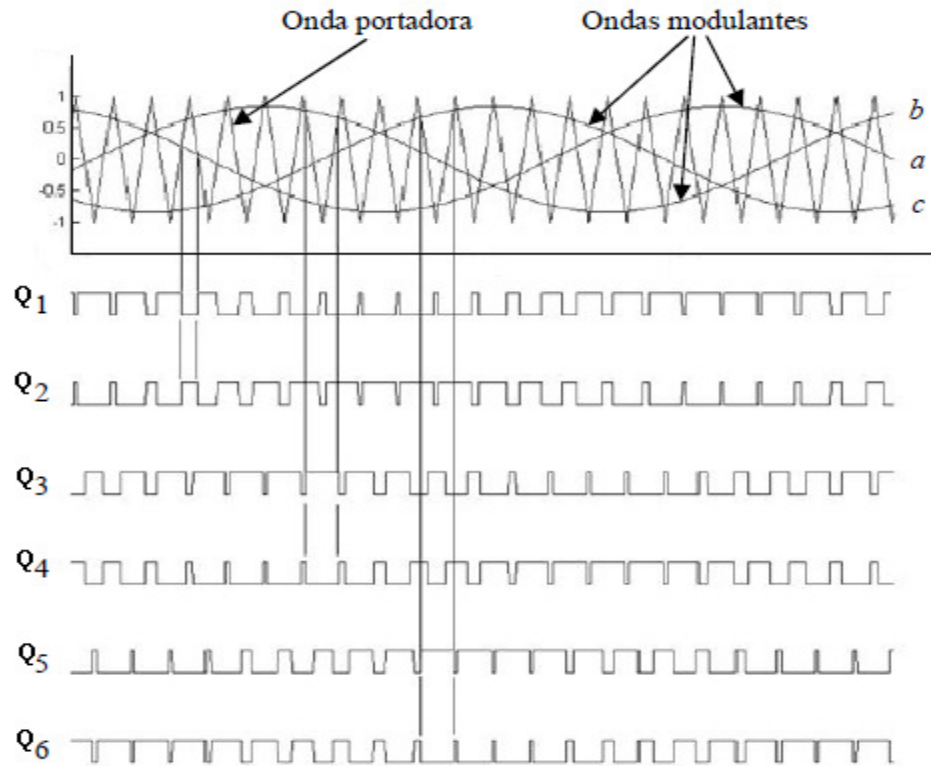


Figura 5.11. Exemplo de uma modulação PWM por sub-harmónica aplicada a um conversor AC/DC.

Na modelação por sub-harmónica, visível na figura 5.11, a configuração do conversor é decidida a cada instante pela intersecção de sinais (modulantes) com amplitude e frequência imposta com outros de frequência mais elevada com forma triangular (portadoras). O gerador PWM utilizado realiza uma modulação sinusoidal decidindo qual o dispositivo a fechar e a abrir num dado braço do inversor, pela comparação entre a portadora e a modulante da respectiva fase. Os IGBTs são colocados em condução ou ao corte mediante a aplicação de pulsos nas suas portas.

As tensões simples à saída do inversor, equação 5.24, são deduzidas através das tensões compostas, equação 5.21, com a condição imposta pela equação 5.23 devido ao sistema ser equilibrado, sendo dadas por:

$$\begin{cases} u_{ab} = u_a - u_b \\ u_{bc} = u_b - u_c \\ u_{ca} = u_c - u_a \end{cases} \quad (5.22)$$

$$u_a + u_b + u_c = 0 \quad (5.23)$$

$$\begin{cases} u_a = \frac{2}{3}u_{ab} + \frac{1}{3}u_{bc} \\ u_b = \frac{2}{3}u_{bc} + \frac{1}{3}u_{ca} \\ u_c = \frac{2}{3}u_{ca} + \frac{1}{3}u_{ab} \end{cases} \quad (5.24)$$

A forma de onda destas tensões está representada na figura 5.12.



Figura 5.12. Forma de onda das tensões simples à saída do inversor.

Admitindo uma tensão DC e uma modulação PWM ideais (frequência de modulação infinita), pode-se relacionar o valor da harmónica fundamental da tensão composta AC à saída dos conversores, $|u_{AC}|$, ilustrada na figura 5.13, com a tensão DC da seguinte forma [40]:

$$|u_{AC}| = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot m \cdot U_{DC} \quad (5.25)$$

onde U_{DC} é a tensão DC imposta à entrada do inversor e m o índice de modulação que é usado para controlar a amplitude da harmónica fundamental da tensão composta de saída da ponte. Note-se que o valor do índice de modulação deve estar compreendido entre 0 e 1, pois para valores superiores a 1 o conversor começa a saturar e o nível de harmónicas de pequena ordem começa a aumentar [38].

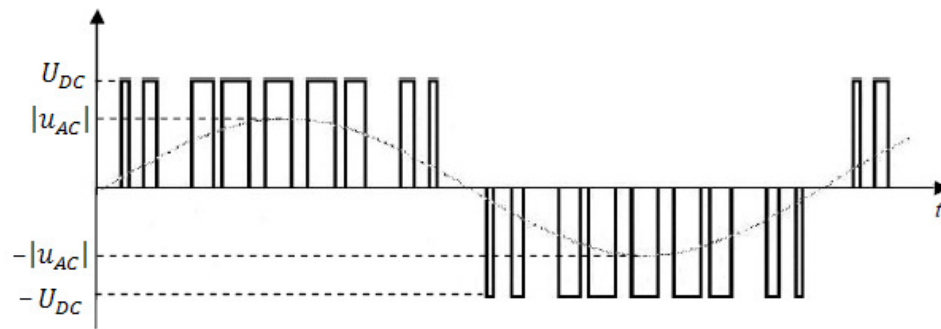


Figura 5.13. Forma de onda da tensão composta à saída do conversor com representação da harmónica fundamental (adaptado de [13]).

Na figura 5.13 está representada a forma de onda da tensão composta à saída do conversor, tal como a sua harmónica fundamental.

5.3.2.2.1 Modo de rectificação

Este modo acontece quando não existe nenhuma falha na rede. É o modo que carrega a bobina, e que a mantém no modo persistente.

Para o conversor funcionar como rectificador não necessita de nenhum controlo, isto é, os transístores manter-se-ão abertos, e a corrente eléctrica passará, apenas, através dos díodos.

O rectificador trabalha adequadamente com tensões impostas no lado AC, impondo correntes no lado DC [38].

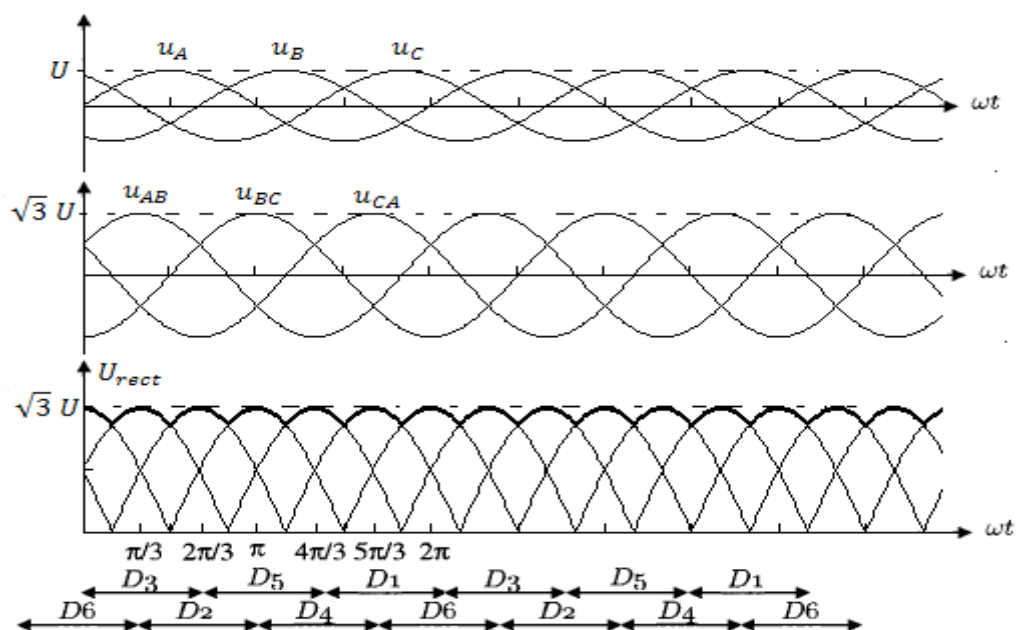


Figura 5.14. Tensões simples, compostas e tensão de saída da rectificação.

A figura 5.14, ilustra o funcionamento do rectificador. A corrente passa, apenas, por dois díodos em simultâneo, como se verifica na figura 5.14. Vai passar naqueles que apresentarem aos seus terminais maior queda de tensão. Desta forma, a tensão média à saída do rectificador pode ser escrita por [38, 40]:

$$U_{rect} = \sqrt{2} \cdot \frac{2}{\pi/3} \int_0^{\pi/6} \sqrt{3} \cdot U \cdot \sin(\omega t) d\omega t = \sqrt{2} \cdot \sqrt{3} \cdot U \cdot \frac{6}{\pi} \cdot \sin\left(\frac{\pi}{6}\right) \quad (5.26)$$

onde U é a tensão simples eficaz à entrada do rectificador.

5.3.2.3 Ligação DC

A ligação entre os dois conversores de potência consiste apenas num condensador em paralelo, como ilustrado na figura 5.15. O condensador será o responsável por alisar a tensão na rectificação de forma a esta apresentar uma forma DC na entrada do “*chopper*”. Na inversão, o condensador recebe a corrente da bobina e impõe uma tensão DC à entrada do inversor, necessária para garantir a conversão DC/AC.

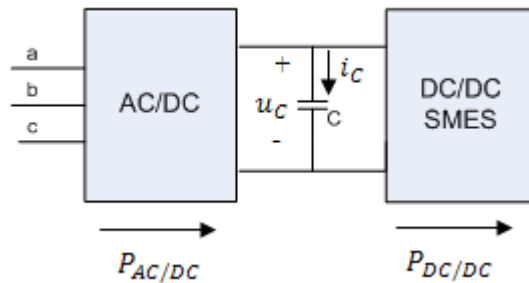


Figura 5.15. Ligação DC.

A variação da energia no condensador depende da potência proveniente da rede através do conversor AC/DC bidireccional (modo rectificação), e da potência entregue à bobina supercondutora através do conversor “*chopper*”, de acordo com a expressão:

$$\frac{dW_C}{dt} = P_{AC/DC} - P_{DC/DC} \quad (5.27)$$

onde $P_{AC/DC}$ e $P_{DC/DC}$ representam a potência consumida pelo conversor bidireccional e pelo “*chopper*” com a bobina supercondutora, respectivamente, no estado de carga da bobina.

Por sua vez a energia no condensador é dada por:

$$W_c = \frac{1}{2} \cdot C \cdot u_c^2 \quad (5.28)$$

Integrando (5.26) e substituindo em (5.27) vem,

$$C = \frac{2 \cdot (P_{AC/DC} - P_{DC/DC})}{u_c^2} \cdot \tau \quad (5.29)$$

onde τ é o tempo de carga do condensador.

5.3.2.4 Filtro

A distorção harmónica criada pelo sinal PWM necessita ser filtrada para que o sistema forneça energia com qualidade. Desta forma, é utilizado um filtro passa-baixo para eliminar/atenuar as harmónicas de alta frequência criadas pelo PWM, e obter a harmónica fundamental da tensão de saída, como ilustrada na figura 5.16.

O filtro em estudo consiste num circuito de 2ª ordem.

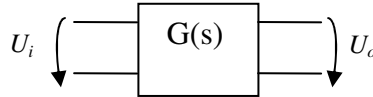


Figura 5.16. Filtro passa-baixo monofásico de ordem 2.

A função de transferência do filtro, $G(s)$, é dada pela seguinte equação [44]:

$$G(s) = \frac{U_o(s)}{U_i(s)} = \frac{1}{(s/\omega_c)^2 + 2\xi s/\omega_c + 1} \quad (5.30)$$

onde ξ é o coeficiente de amortecimento e $\omega_c = 2\pi f_c$, sendo ω_c e f_c a frequência de corte do filtro em rad/s e em Hz, respectivamente.

Na figura 5.17 está ilustrado o diagrama de Bode para a função de transferência do filtro.

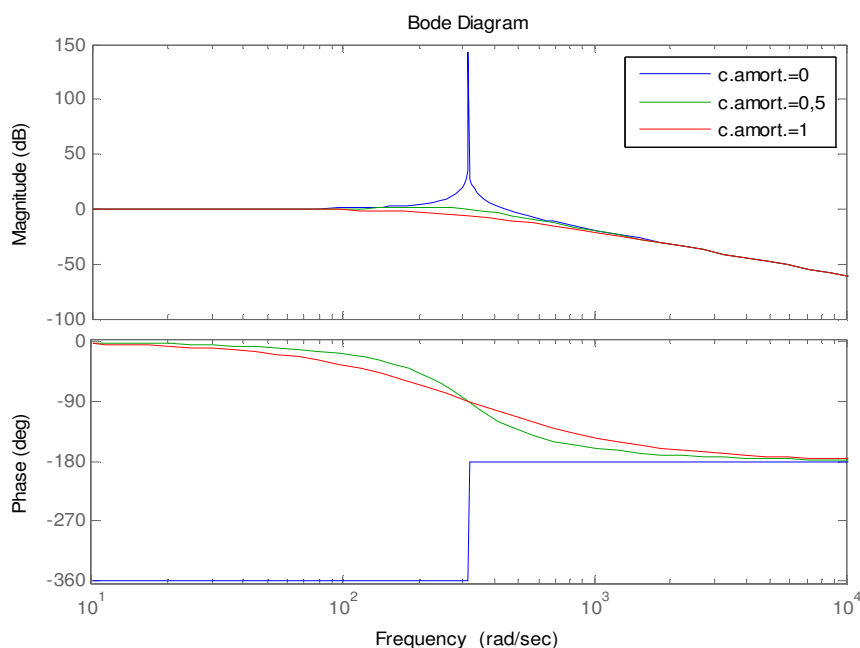


Figura 5.17. Diagrama de Bode de $G(s)$ para vários ξ .

Como se verifica na figura 5.17 para as componentes de frequência acima da frequência de corte haverá uma atenuação considerável, fazendo com que tensão transformada pelo conversor AC/DC no lado da rede apresente menos harmónicas.

5.3.3 Sistema de controlo

Para simplificar um pouco o sistema de controlo, assume-se que nunca acontece uma falha num instante em que a bobina não tenha carga, isto é, a falha acontece quando a bobina está totalmente carregada, e que a duração da falha não é superior ao tempo de protecção da bobina. Caso a bobina não estivesse totalmente carregada, ou o tempo da falha fosse superior ao tempo de protecção, poderia acontecer que a bobina não estivesse energia suficiente para resolver o problema. Caso a bobina estivesse totalmente descarregada, apenas aconteceria que o sistema continuaria com a falha na totalidade.

O controlo geral do sistema é apresentado no fluxograma da figura 5.18, de forma simplificada.

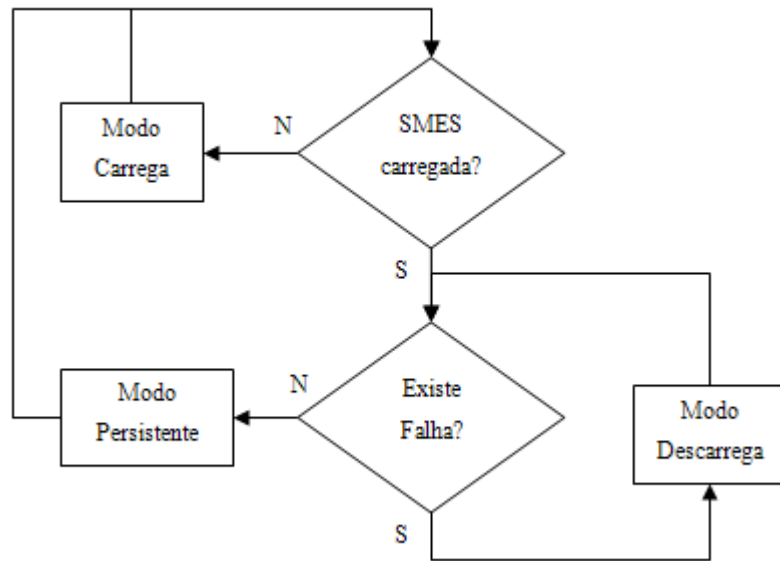


Figura 5.18. Fluxo grama do funcionamento do sistema de controlo.

O controlo para o modo carrega e persistente consiste apenas em activar um controlador de corrente que controla a corrente na bobina supercondutora. Para tal é utilizado um controlador ilustrado na figura 5.19 [41].

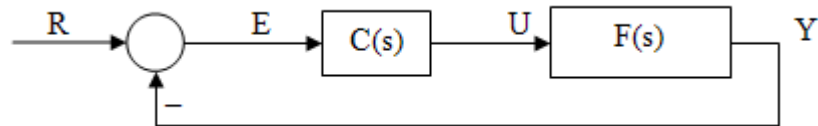


Figura 5.19. Topologia do controlador de corrente e de tensão.

onde R é o valor de referência, E é o erro, dada por $E = R - Y$, U é a excitação do sistema e Y a saída deste. $C(s)$ representa a função de transferência do controlador, e $F(s)$ a função de transferência do modelo do sistema.

O sistema de controlo para o modo descarga consiste em dois controladores: um idêntico ao anterior, mas neste caso de tensão, mantendo a tensão constante na ligação DC, e um controlador PWM para o conversor bidireccional, como está ilustrado na figura 5.11.

5.4 Conclusão

Neste capítulo foi feita uma análise dos principais parâmetros do sistema SMES. Para tal estudou-se de forma detalhada o funcionamento de cada bloco do sistema.

É possível verificar a extrema importância da electrónica de potência nos sistemas SMES, pois ela é a responsável tanto pelo controlo como por garantir a interface entre a rede AC e o sistema SMES.

6 Dimensionamento da bobina supercondutora

6.1 Introdução

Neste capítulo é feito o dimensionamento da bobina supercondutora por elementos finitos através da aplicação informática Flux2D ®.

Pelo facto da bobina ser constituída por fita BSCOO, torna-se necessário realizar uma breve análise desta, apresentando algumas das suas principais características.

6.2 Fita BSCCO-2223

O BSCCO (Bismuth Strontium Calcium Copper Oxide), conhecido por "bisko", pertence à família dos supercondutores de alta temperatura (HTS) tendo como formula química geral $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_n\text{Cu}_{n+1}\text{O}_{2n+6-d}$ [35]. Foi descoberta por Maeda et al. em 1988 e foi o primeiro HTS descoberto que contém na sua composição elementos de terras raras [36].

Os compostos fabricados com esta cerâmica têm sido objectos de estudos para várias aplicações eléctricas, entre elas, os SMES [36].

Normalmente, os fios BSCCO são fabricados comprimindo o material supercondutor cerâmico (um pó) dentro de um tubo de prata [37]. A prata permanece segregada entre os grãos cerâmicos e desempenha um papel bastante importante, pois é o elemento que facilita a passagem da corrente eléctrica entre os cristais supercondutores. É a responsável pelo aperfeiçoamento da resistência mecânica, e também por gerar densidades de corrente crítica muito acima daquelas normalmente encontradas para a cerâmica BSCCO [37]. Para além destas vantagens, esta técnica tem duas grandes desvantagens: primeiro, o custo da prata torna os cabos muito caros; segundo, os fabricantes não têm muito controlo sobre a estrutura detalhada do fio interno de BSCCO para otimizar o seu desempenho [36].

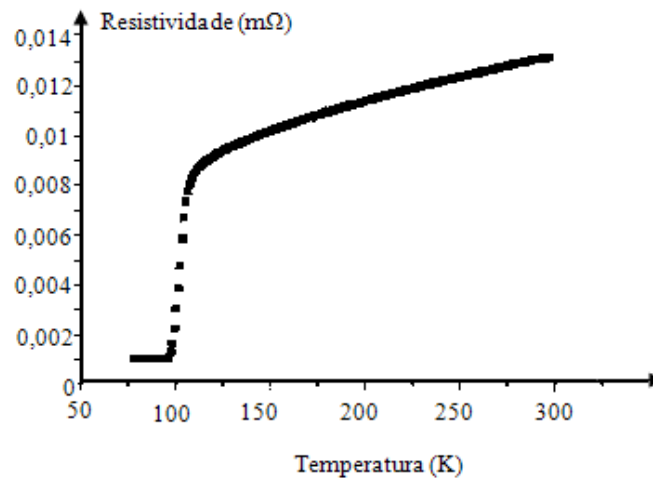


Figura 6.1. Exemplo da curva da resistividade de uma BSCCO-2223 (adaptado de [37]).

O BSCCO-2223 ($\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_{10}$) tem uma temperatura crítica $T_c = 107\text{ K}$ (figura 6.1) que pode ser atingida através do azoto liquido (77 K), e este é o factor que os torna bastante atractivos [37, 38].

6.3 Projecto da bobina supercondutora

Nesta secção é feito o dimensionamento da bobina supercondutora conforme os parâmetros da perturbação. Desta forma, inicialmente é feita a identificação do problema, para a partir destes projectar a bobina.

6.3.1 Identificação do problema

O problema em causa não é real, mas sim um exemplo de forma a visualizar o procedimento para o dimensionamento da bobina e posteriormente do sistema SMES (capítulo 7).

O sistema SMES será simulado para o segmento de distribuição de forma a proteger cargas, consideradas críticas, de interrupções de tensão com duração de 1 ciclo ($0,02\text{ s}$).

Segmento da rede: Consumidor final	230Vef, 50Hz
Carga	20kW
Falha	Interrupção de tensão de 1 ciclo (0,02s)

Tabela 6.1. Parâmetros do sistema.

6.3.2 Especificações da fita

O raio mínimo de curvatura e a corrente máxima, à temperatura de 77 K, são (para mais informações ver [43]):

Raio de curvatura mínimo	3 cm
Corrente crítica	85 A
Espessura	~0,23 mm
Largura	~4,2 mm

Tabela 6.2. Características da fita supercondutora.

6.3.3 Parâmetros da SMES

Os parâmetros da bobina supercondutora, vistos no capítulo 5, têm que ser compatíveis com os parâmetros dos vários componentes do sistema.

Assume-se uma capacidade de armazenamento de 1 kJ, uma tensão DC de 563 V (necessário para repor os 230 V_{ef} AC na rede após a passagem pelo inversor).

A corrente crítica da bobina supercondutora é 90 A [43]. Neste dimensionamento, assumiu-se como corrente máxima pouco mais de 77 % da corrente crítica da fita.

W _{max}	1kJ
U _{DC}	563V
I _{max}	70A

Tabela 6.3. Parâmetros para a bobina supercondutora.

6.3.4 Dimensionamento no Flux2D®

O objectivo desta secção é encontrar uma bobina, de forma a otimizar a quantidade de fita supercondutora para um coeficiente de auto-indução, L , que cumpra os com os parâmetros referidos acima.

Pela equação 4.1 e pelos parâmetros acima, tabela 6.3, chega-se:

$$L = \frac{2 \cdot W_{max}}{I_{max}^2} \approx 0,41 H \quad (6.1)$$

Tem-se então o valor de coeficiente de auto-indução que se pretende encontrar.

Procede-se a uma análise da bobina, cuja forma é apresentada na figura 6.2. Esta análise é feita pela variação dos parâmetros da bobina: o raio interno, R_i , e o número de espiras, N .

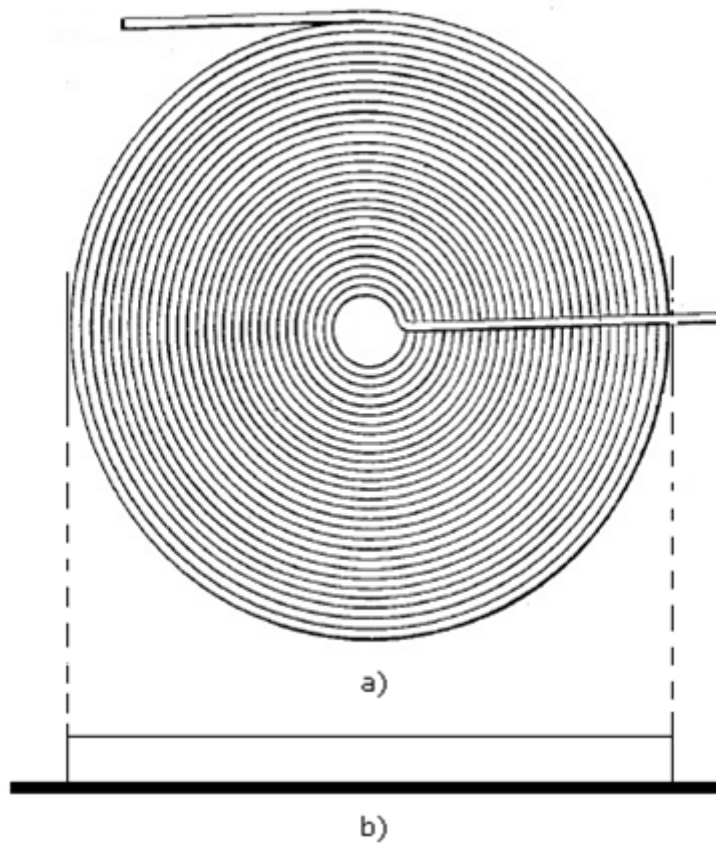


Figura 6.2. Vista em planta da bobina, a). Vista de frente, b).

Na tabela 6.4 são apresentados os valores de L para cada R_i em função do número de espiras.

L (H)	Ri (mm)\ N	600	800	1000	1200	1500
	30	0,059437	0,126703	0,231112	0,380892	0,708694
	40	0,070203	0,145317	0,25991	0,422174	0,773071
	50	0,080804	0,163395	0,287336	0,460967	0,832766
	60	0,114044	0,219376	0,371504	0,578795	1,010984
	100	0,137636	0,258856	0,430635	0,661026	1,134609

Tabela 6.4. Coeficientes de auto-indução para cada R_i (N).

Através do OFFICE/EXCEL® obtém-se a evolução do L em função do número de espiras, para cada R_i , ilustrados na figura 6.3.

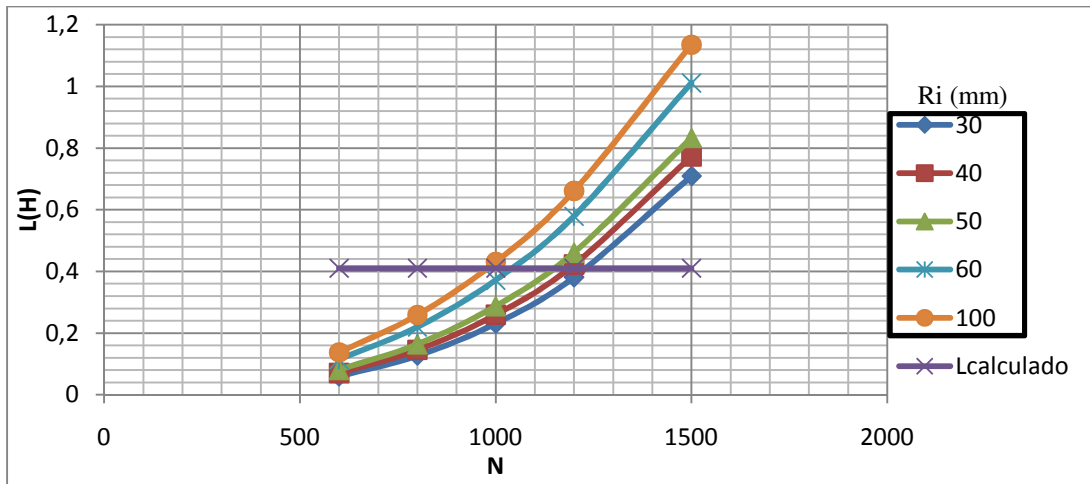


Figura 6.3.. Curva do de cada L para cada R_i em função do N .

Fazendo uma aproximação da evolução de $L(N)$, através da aplicação informática OFFICE/EXCEL®, é possível encontrar as seguintes funções, para cada R_i :

$$\left\{ \begin{array}{l} L_{30}(N) = 2 \times 10^{-9} \cdot N^{2,7045} \\ L_{40}(N) = 4 \times 10^{-9} \cdot N^{2,6931} \\ L_{50}(N) = 7 \times 10^{-7} \cdot N^{2,5348} \\ L_{60}(N) = 7 \times 10^{-7} \cdot N^2 - 0,0005 \cdot N + 0,138 \\ L_{100}(N) = 8 \times 10^{-7} \cdot N^2 - 0,0005 \cdot N + 0,1609 \end{array} \right. \quad (6.2)$$

A quantidade de fita utilizada, para cada caso, é dada pela série numérica:

$$l = 2 \cdot \pi \cdot \sum_{n=1}^N (R_i + (n-1) \cdot E) \quad (6.3)$$

onde l é o comprimento total de fita BSCCO-2223, E a espessura da fita.

Analisando a intersecção do $L_{calculado}$ com as funções de $L(N)$ para cada R_i (figura 6.3), encontra-se o número de espiras para cada $L(N)$. Através da equação 6.3 e com o respectivo N consegue-se calcular um valor aproximado de l , para cada R_i .

Ri (mm)	30	40	50	60	100
N (~)	1210	1170	1150	1040	942
l (m) (~)	1377	1368	1399	1240	1288

Tabela 6.5. Comprimento total de fita para cada $R_i(N)$.

É possível verificar que a bobina que apresenta menor quantidade de fita é a de $R_i = 60 \text{ mm}$ e $N = 1040$, apresentando um $l = 1240 \text{ m}$.

Através do Flux2D® para o R_i e N encontrados acima obtêm-se um $L = 0,55 \text{ H}$. Sendo cerca de 30% superior ao pretendido e tendo em conta que o principal objectivo é otimizar a quantidade de fita segue-se uma variação do N até o pretendido L , resultando um $N = 900$, originando um $L = 0,41 \text{ H}$ ($W = 1 \text{ kJ}$) e um comprimento de aproximadamente 973 m .

6.4 Conclusão

Para obter o valor pretendido do coeficiente de auto-indução, $0,41\text{ H}$ seriam necessários 973 m de fita supercondutora. Pelo facto da faculdade não ter disponível essa quantidade de fita, impossibilitando a construção, este capítulo serve apenas para ter uma ideia da quantidade de fita supercondutora que seria necessária para um SMES de 1 kJ .

7 Implementação do sistema SMES em Matlab/Simulink®

7.1 Introdução

Neste capítulo é simulado um sistema SMES através do software Matlab/Simulink®.

Inicialmente é implementado o modelo do conversor “*chopper*” com a bobina com a finalidade de testar os dois controladores que monitorizam a bobina através do comando dos IGBTs. O controlador de corrente para controlar a corrente de carga da bobina (no modo de carga e persistente) e o controlador de tensão para controlar a tensão na ligação DC, controlando desta forma a descarga da energia acumulada.

Segue-se a implementação de um sistema SMES aplicado para melhorar a qualidade de energia entregue a uma carga, devido à ocorrência de perturbações, denominadas por cavas de tensão.

7.2 Controlo da bobina supercondutora

O controlo da bobina é feito através do controlo do $C_{DC/DC}$ ¹³, no qual ela está inserida. Para tal basta controlar os IGBTs, S1 e S2, do conversor.

Na figura 7.1 está representado o modelo discreto do $C_{DC/DC}$ com a bobina.

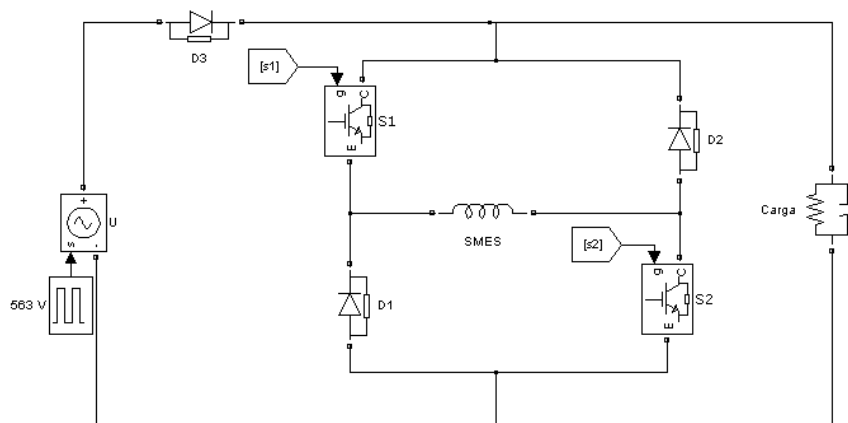


Figura 7.1. Conversor “chopper” com bobina supercondutora.

¹³ Conversor DC/DC

O controlo dos IGBTs é feito consoante o estado do sistema, isto é, caso esteja no modo de carga e persistente é activado o controlador de corrente, caso esteja no modo de descarga é activado o controlador de tensão. Para ensaiar ambos os modos, utilizou-se à entrada do $C_{DC/DC}$ uma onda quadrada com $\sqrt{2} \cdot \sqrt{3} \cdot 230 \text{ V}$ ($\approx 563 \text{ V}$) de amplitude, um período de $0,08 \text{ s}$ e um “*duty cycle*” de 75 %, ver figura 7.3. O sinal de entrada representa a tensão na ligação DC, simulando a perturbação quando a tensão é 0 V e o estado normal quando 563 V .

É utilizada uma bobina de $L = 0,41 \text{ H}$ (dimensionada no capítulo 6), com uma carga RC em paralelo, $R = 20 \Omega$ e $C = 0,1 \text{ mF}$, para garantir a continuidade da tensão e a descarga da energia.

O diódo D3 garante apenas um sentido na corrente de carga, desta forma quando a bobina descarga a corrente seguirá apenas para a carga não retornando para a fonte.

Na figura 7.2 estão ilustrados os dois controladores.

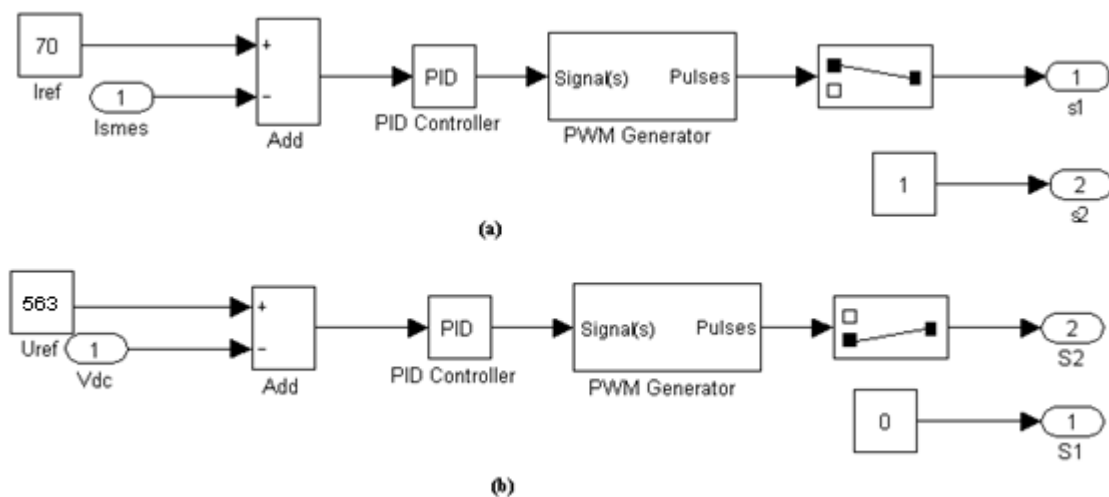


Figura 7.2. Controladores de: a) corrente; b) tensão.

Ambos os controladores consistem em um controlador PI (na figura “PID Controller”*) em série com o modelo da instalação, em malha fechada. Dada a dificuldade em determinar uma função de transferência que descrevesse a dinâmica da instalação, o $C_{DC/DC}$, devido ao seu comportamento não linear, pois os IGBTs são dispositivos não lineares, optou-se, para simplificar o problema, por fazer a retroacção através da leitura, seja de corrente ou de tensão, em função do estado de cada transístor. Caso contrário, ter-se-iam três modelos lineares:

1. S1 e S2 fechados (modo carrega);
2. S1 e S2 abertos (modo descarrega);
3. S1 aberto e S2 fechado (modo persistente).

O ajuste dos parâmetros K_p (ganho proporcional) e T_i (tempo integral) destes dois controladores PI foi feito por tentativa e erro, de acordo com [41]:

1. Iniciar com um valor reduzido de ganho K_p . Aumentar K_p até obter uma velocidade de resposta aceitável tolerando alguma sobrelevação e algum erro estático.
2. Iniciar com um valor elevado de T_i . Reduzir T_i até obter a remoção do erro estático num tempo aceitável sem deixar o sistema ficar instável.

O PI utilizado tem os seguintes parâmetros:

$$K_p \left(1 + \frac{1}{sT_i} \right) = 1,1 \left(1 + \frac{1}{15,8 s} \right) \quad (7.1)$$

A utilização do bloco “PWM Generator”^{*} vai definir a duração de cada pulso consoante a saída do PI, controlando desta forma S1 e S2.

A figura 7.3 mostra o resultado da simulação.

^{*} Blocos da biblioteca do Simulink.

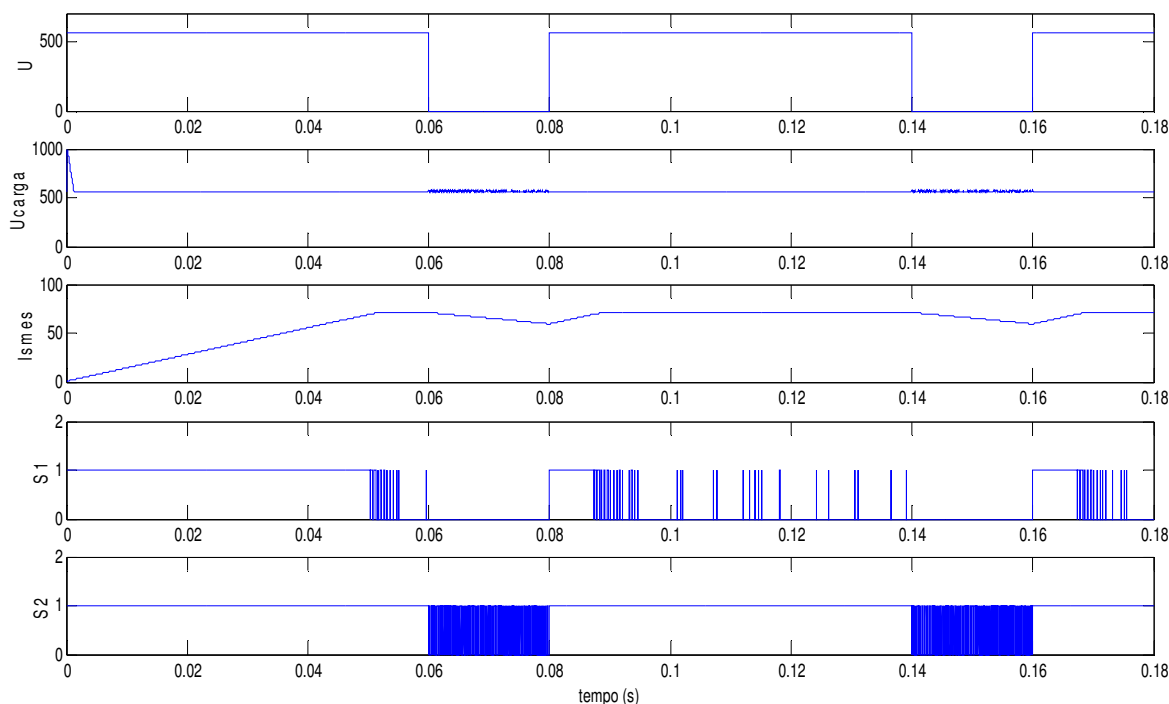


Figura 7.3. Resultado da simulação de carga e descarga da bobina supercondutora inserida no “chopper”.

É possível verificar o bom funcionamento de ambos os controladores. A tensão na carga, U_{carga} , apresenta-se aproximadamente constante nos 563 V. De notar que a forma de onda da corrente está coerente com a teórica vista no capítulo 5 (figuras 5.3, 5.4 e 5.5).

Os dois gráficos inferiores apresentam os sinais de comando dos IGBTs verificando-se que quando o seu carregamento ambos os transístores estão fechados (modo de carga). Chegada a corrente máxima definida, de 70 A, o transístor S2 fica ligado e S1 abre, para ficar no estado persistente, no entanto, devido às pequenas perdas nos dispositivos, já referidas, notam-se comutações repentinas em S1, alterando entre o estado de carga e persistente, de forma a manter a corrente em 70 A. Aos 0,06 s (e aos 0,014 s), acontece a interrupção de tensão, passa-se para o modo de descarga, S1 vai a 0 e S2 comuta rapidamente, entre 0 e 1, para fazer um bom controlo da corrente de descarga e assim da tensão na carga RC, que posteriormente vai ser a tensão na ligação DC.

7.3 Modelo do sistema SMES

Como se pode observar na figura 7.4, o modelo discreto inclui uma representação detalha do sistema SMES (os conversores de potência $C_{AC/DC}$ ¹⁴ e $C_{DC/DC}$; a ligação DC; e o filtro) numa rede de distribuição que alimenta uma carga resistiva. A rede de distribuição é representada simplesmente por uma fonte de tensão alternada sinusoidal trifásica ($U_{ef} = 230 V_{ef}$, $f = 50 Hz$).

Entre a alimentação e a carga encontra-se o bloco *cava de tensão* para simular a perturbação na rede.

O sistema SMES é ligado em paralelo com a carga, para a poder alimentar quando a ocorrência de perturbação.

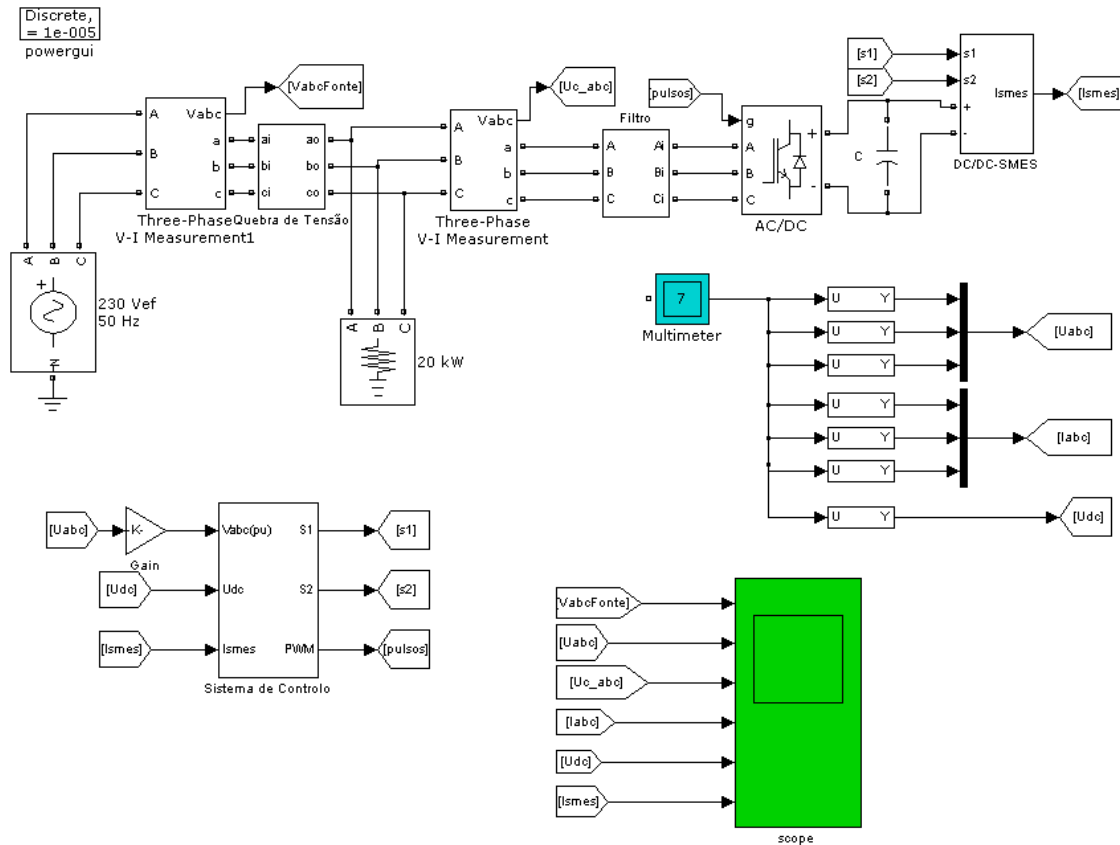


Figura 7.4. Modelo completo da rede e carga, com sistema SMES.

¹⁴ $C_{AC/DC}$

Na figura 7.4 está ilustrado o modelo do sistema completo, no entanto, inicialmente foi testado o sistema sem o *Filtro*, sendo necessária uma pequena mudança no sistema de controle que será analisada mais à frente.

O primeiro modelo permite observar à saída do $C_{AC/DC}$ (na carga) sinais de tensões trifásicas PWM. Neste modelo também é analisado a ligação DC e a corrente na SMES, como visto na secção 7.2.

No segundo modelo apenas é inserido o filtro passa-baixo para poder retirar a harmónica fundamental das tensões trifásicas referidas anteriormente. Segue-se então uma análise de cada bloco.

7.3.1 Falha: cava de tensão

Assumiu-se que a falha em causa é uma cava de tensão (neste caso interrupção) com duração de um ciclo (0,02 s).

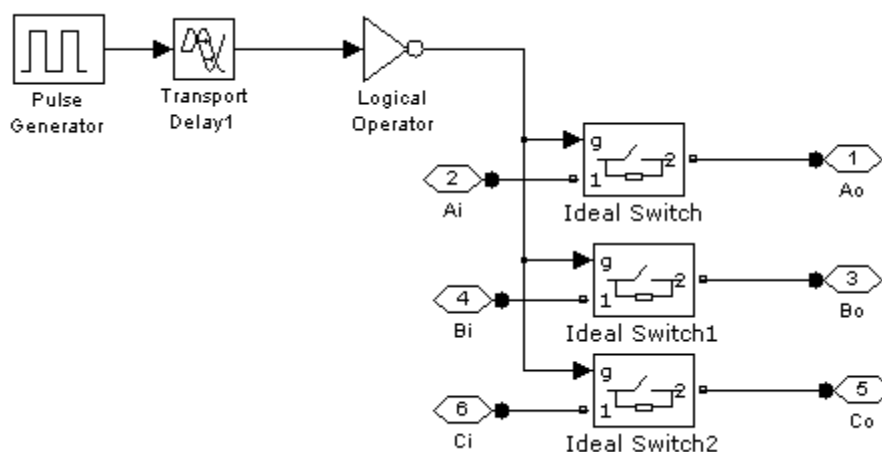


Figura 7.5. Modelo da cava de tensão.

Analisando a figura 7.5, para ensaiar esta perturbação utilizou-se o bloco “Ideal Switch”^{*} em série com cada fase da rede. Estes que serão controlados (para comutar do estado de condução ou de aberto) pelo “Pulse Generator”^{*} de forma a cortar a energia em cada uma das fases, simulando assim a interrupção de tensão na rede. O sinal de controlo é uma onda quadrada de amplitude 1, período de 0,04 s e “duty cycle” de 50 %, originando uma falha de 0,02 s. O bloco “Transport Delay”^{*} dá um atraso ao sinal de controlo, no caso de 0,06 s, para garantir o total carregamento da bobina quando a ocorrência de falha.

^{*} Blocos da biblioteca do Simulink.

7.3.2 Controlo do sistema

O sistema de controlo, ilustrado na figura 7.6, é constituído por quatro blocos: o Regulador de Tensão; o Detector de Falha; o Controlador DC/DC; e o Gerador PWM.

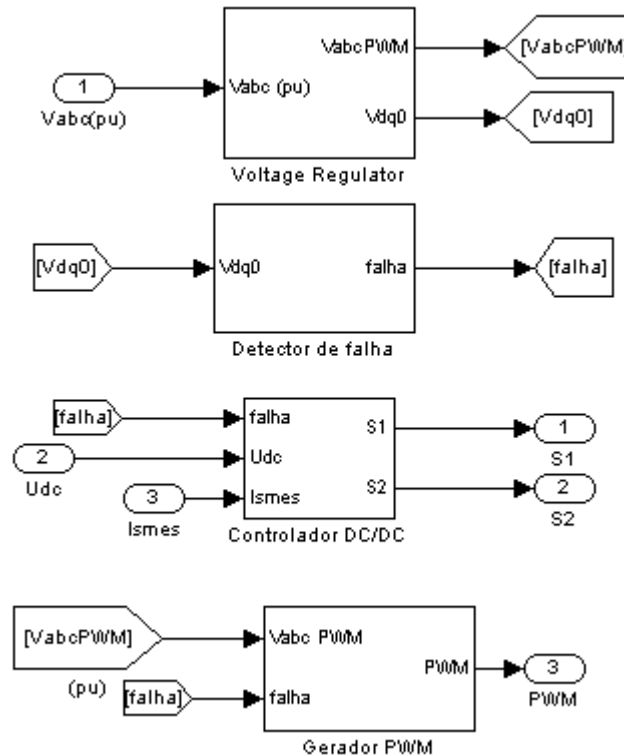


Figura 7.6. Sistema de controlo

A interacção entre eles vai fazer com que o sistema funcione como pretendido. Segue-se então uma análise detalhada de um deles.

7.3.2.1 Regulador de tensão

O regulador de tensão, figura 7.7, é um bloco auxiliar para adaptar os sinais adquiridos de forma a poderem ser analisados.

Este bloco recebe o valor das tensões trifásicas instantâneas na linha em p.u.¹⁵, $V_{abc}(pu)$, e faz uma mudança para o referencial $dq0$ (ver anexo I). Para um sistema equilibrado e sem falha as componentes d e q têm de apresentar 1 e 0, respectivamente. A diferença entre os valores instantâneos destas e as suas referências entram no controlador PI, e desta forma estas são corrigidas garantindo assim um erro aproximadamente nulo.

¹⁵ p.u. por unidade

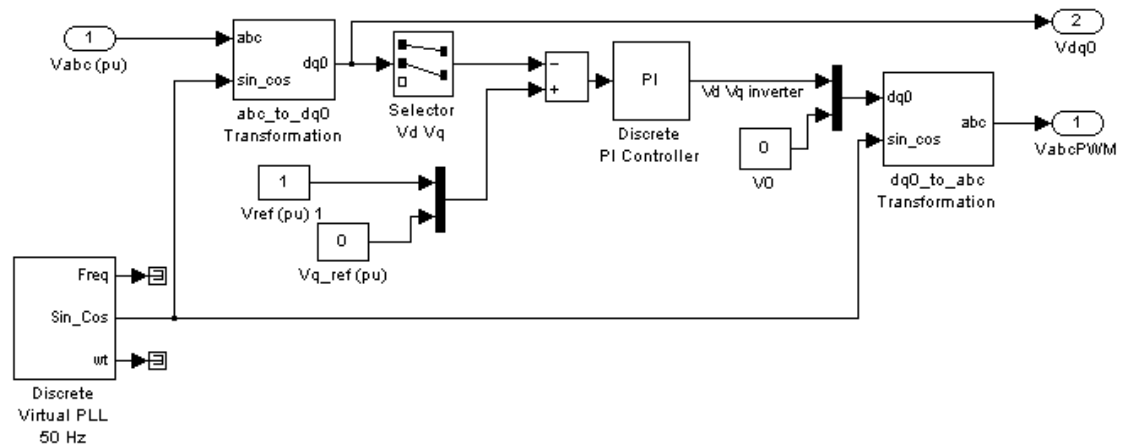


Figura 7.7. Modelo do Regulador de tensão.

Estas tensões $dq0$ corrigidas sofrem agora a transformação inversa originando um sistema de tensões trifásicas equilibradas, V_{abcPWM} , que serão as tensões de controlo do *Gerador PWM*.

A saída V_{dq0} , que apenas sofre a alteração para o referencial $dq0$, é necessária para o *Detector de falha*.

7.3.2.1 Detector de falha

Para detectar a falha basta apenas analisar a componente d das tensões $dq0$ convertidas pelo regulador de tensão.

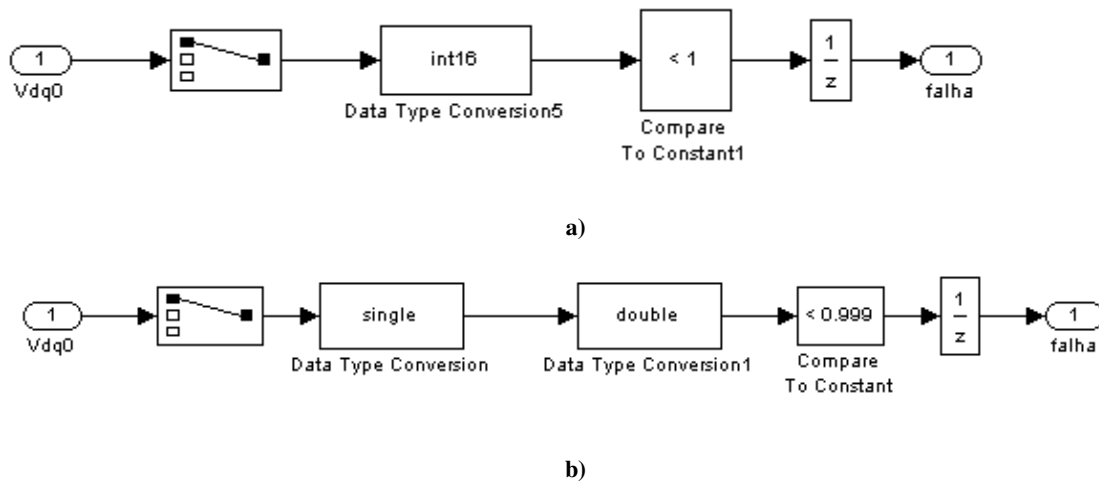


Figura 7.8. Modelos do Detector de falha, para o modelo sem filtro, a); e com filtro, b).

Para poder analisar este sinal é necessária uma mudança de variável, “Data Type Conversion”*, de forma a poder comparar o valor da componente d com o valor de referência 1, figura 7.8 a). Para o segundo caso, com o filtro, figura 7.8 b), o valor de referência é 1 %

inferior, pois o facto da conversão DC/AC não ser perfeita e a existência de perdas no filtro este valor sofre um pequeno decréscimo, que pode ser desprezado.

Caso o sinal à entrada do “Compare to Constant”^{*} seja inferior ao valor de referência o sinal *falha* de saída apresenta o valor 1, caso contrário 0.

7.3.2.3 Controlo do conversor DC/DC “chopper”

O controlo do $C_{DC/DC}$ já foi testado anteriormente, em 7.2. Nesta secção apenas é apresentada a forma de comutação (figura 7.9) para cada controlador consoante o estado do sistema, isto é, o modo de funcionamento em que se encontra.

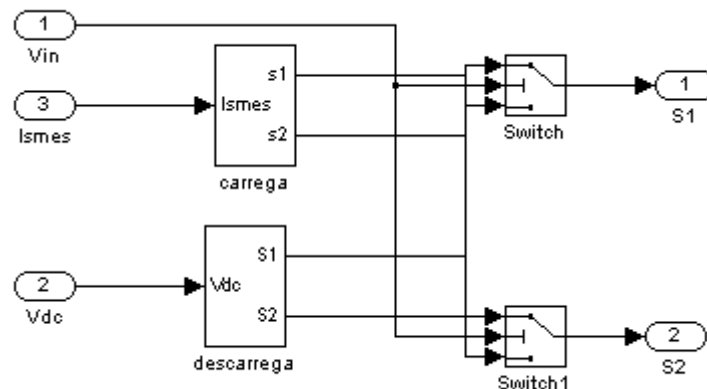


Figura 7.9. Modelo do Controlador DC/DC.

O V_{in} recebe o sinal *falha* e consoante este, 0 ou 1, vai comutar as saídas S1 e S2, entre as do controlador de corrente ou controlador de tensão, respectivamente.

7.3.2.2 Controlo conversor AC/DC bidireccional

A segunda saída do *Regulador de Tensão*, V_{abcPWM} , é um sinal de tensões trifásicas equilibradas, em pu. Estas tensões serão as ondas modulantes (figura 5.10) responsáveis por controlar o *Gerador PWM* de forma a originar o sinal PWM responsável pelo controlo dos IGBTs do $C_{AC/DC}$ (modo inversão).

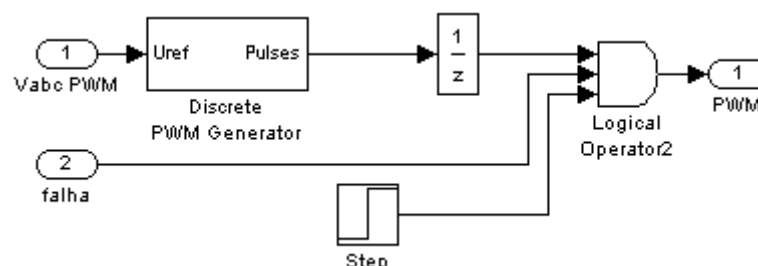


Figura 7.10. Modelo do Gerador PWM.

No entanto, como já foi visto, o modo inversão só acontece quando existe falha no sistema, daí o AND entre o sinal PWM e *falha*.

7.3.3 Ligação DC

A ligação DC consiste apenas no condensador C em paralelo entre ambos os conversores, como ilustrado na figura 7.4.

O cálculo do condensador é feito pela equação 5.30, para o momento de carga da bobina:

$$C = \frac{2 \cdot (P_{DC/DC} - P_{AC/DC})}{u_c^2} \cdot \tau \quad (7.2)$$

$$P_{DC/DC} = P_{SMES} + 2P_S \quad (7.3)$$

$$P_{AC/DC} = 2P_D \quad (7.4)$$

com P_D sendo a potência nos díodos do $C_{AC/DC}$, P_S nos IGBTs do $C_{DC/DC}$ e P_{SMES} a potência absorvida pela bobina.

Pelos blocos do Matlab/Simulink®, a resistência de cada dispositivo é equivalente, logo:

$$P_{DC/DC} - P_{AC/DC} = P_{SMES} \quad (7.5)$$

Por sua vez, P_{SMES} é dada derivando (5.18) para um tempo de carga, $t_{carg} = \frac{0,41 \cdot (70-65)}{537} = 0,0038 \text{ s}$ (assumindo $I_{min} = 65 \text{ A}$), apresentando o valor de $P_{SMES} \approx 2673 \text{ W}$. Substituindo em (5.30) e para um tempo de armazenamento de aproximadamente 1/2 do ciclo vem:

$$C = \frac{2 \cdot 2673}{537^2} \cdot \frac{1}{2 \cdot 50} \approx 0,19 \text{ mF} \quad (7.6)$$

7.3.4 Filtro

O filtro passa-baixo consiste num circuito RLC, como ilustrado na figura 7.11.

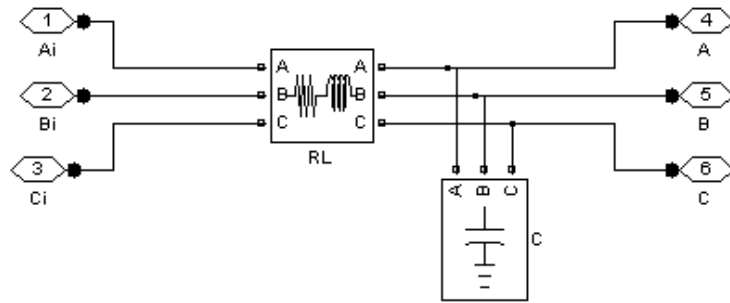


Figura 7.11. Filtro passa-baixo.

Pela equação 5.31, e para um coeficiente de amortecimento de $\xi = 0,4$ e uma frequência de corte de $f_c = 50 \text{ Hz}$ as componentes do filtro apresentam os seguintes valores:

$$\begin{cases} R = 0,5 \, \Omega \\ L = 2 \, \text{mH} \\ C = 5 \, \text{mF} \end{cases}$$

No entanto, com este valor de condensador não se obteve um bom resultado, pelo que se recorreu à tentativa e erro até alcançar uma simulação aceitável. Desta forma, utilizou-se o bloco “Three-phase parallel RLC load”* (na figura 5.11 corresponde ao bloco C) sendo apenas um condensador com uma potência reactiva negativa de 35 MVar , correspondendo a um $C = 28,9 \text{ mF}$. Tendo ficado a resistência e a bobina com os valores dimensionados, referidos acima.

7.3.5 Resultados

Nesta secção são expostos os resultados dos modelos implementados em Matlab/Simulink®. Inicialmente é apresentado o resultado do sistema sem a aplicação do sistema SMES. E seguidamente são apresentados os resultados para o modelo com o sistema SMES sem filtro, e com filtro.

7.3.5.1 Simulação do modelo sem sistema SMES

Como tinha sido referida a perturbação do sistema era a queda de tensão, neste caso com um $\Delta V = 100\%$.

A figura 7.12 ilustra as formas de onda da tensão simples da fonte, $U_{s_{fonte}}$, e da tensão simples na carga, $U_{s_{carga}}$, quando a ocorrência da falha no modelo sem aplicação do sistema SMES. Verifica-se que nos intervalos de tempo $[0,06\text{ s}; 0,08\text{ s}]$, $[0,1\text{ s}; 0,12\text{ s}]$ e $[0,14\text{ s}; 0,16\text{ s}]$ a carga não recebe alimentação de tensão da fonte devido à ocorrência da falha.

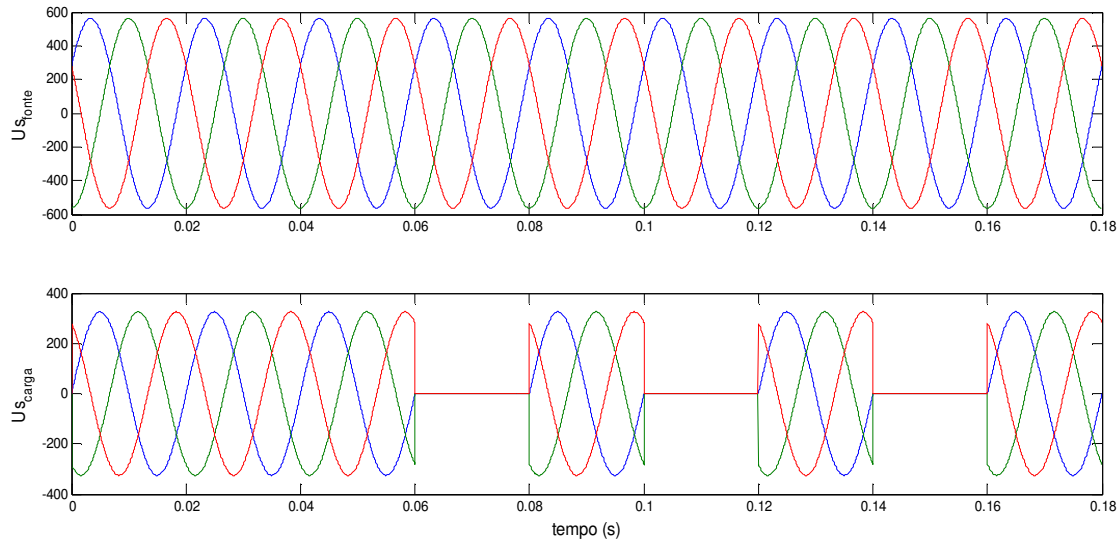


Figura 7.12. Resultado do modelo geral sem sistema SMES.

7.3.5.2 Simulação do modelo com o sistema SMES, sem filtro

O objectivo deste modelo era observar as formas de onda da tensão (simples e composta) na carga. As figuras que se seguem ilustram ambas as formas de ondas para as tensões.

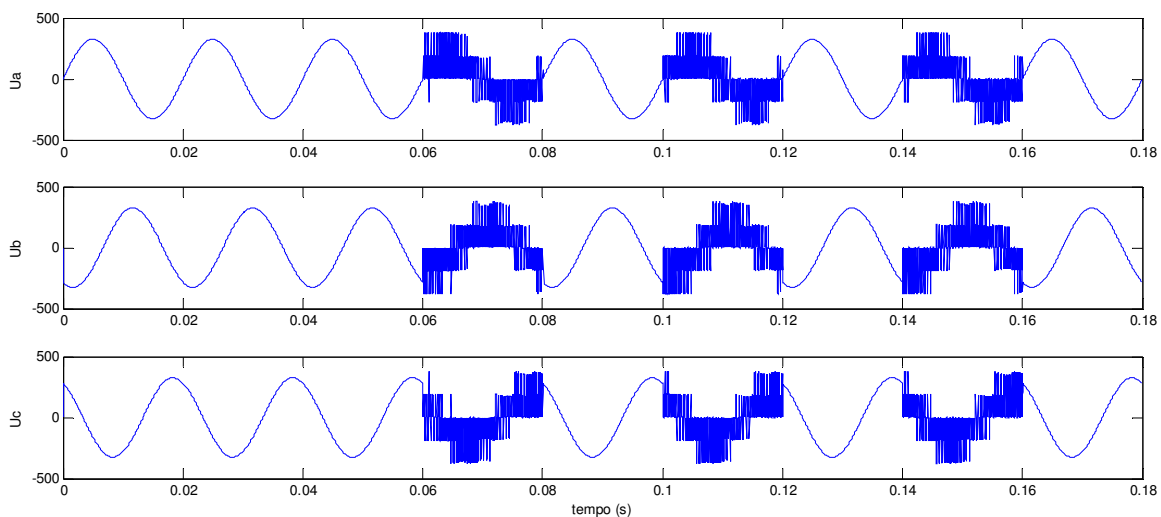


Figura 7.13. Tensões simples do modelo geral sem filtro.

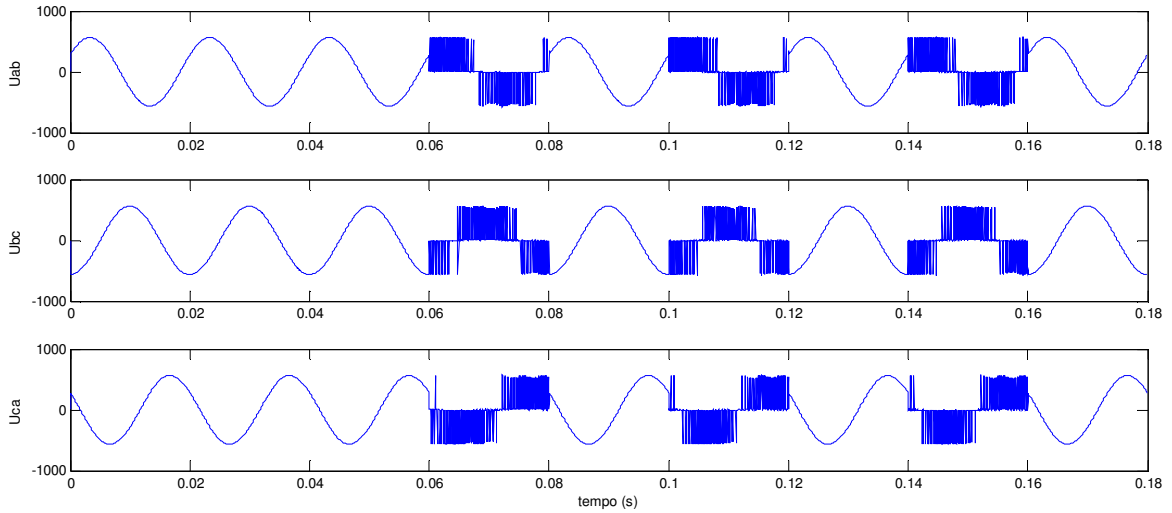


Figura 7.14. Tensões compostas do modelo geral sem filtro.

As formas de onda de tensão simples (figuras 7.13) encontram-se desfasadas entre si de 120° com uma frequência de 50 Hz e apresentam um aspecto idêntico ao representado na figura 5.11, com $\pm 2/3 U_{DC} \approx 375 V$ e $\pm 1/3 U_{DC} \approx 188 V$. As tensões compostas, representadas na figura 7.14, encontram-se igualmente desfasadas entre si de 120° com uma frequência de 50 Hz e apresentam uma forma semelhante à representada na figura 5.12, com $U_{DC} \approx 563 V$.

Analisando agora o $C_{DC/DC}$ e a ligação DC, na figura 7.15, verifica-se uma tensão média de 537 V quando no modo de carga e persistente. Tensão esta que quando a ocorrência de falha passa para 565 V, imposta pela SMES e controlada pelo controlador do $C_{DC/DC}$.

A forma de onda da corrente na bobina está coerente com a teórica e com a secção 7.2, como se pode verificar na figura 7.15 (I_{SMES}).

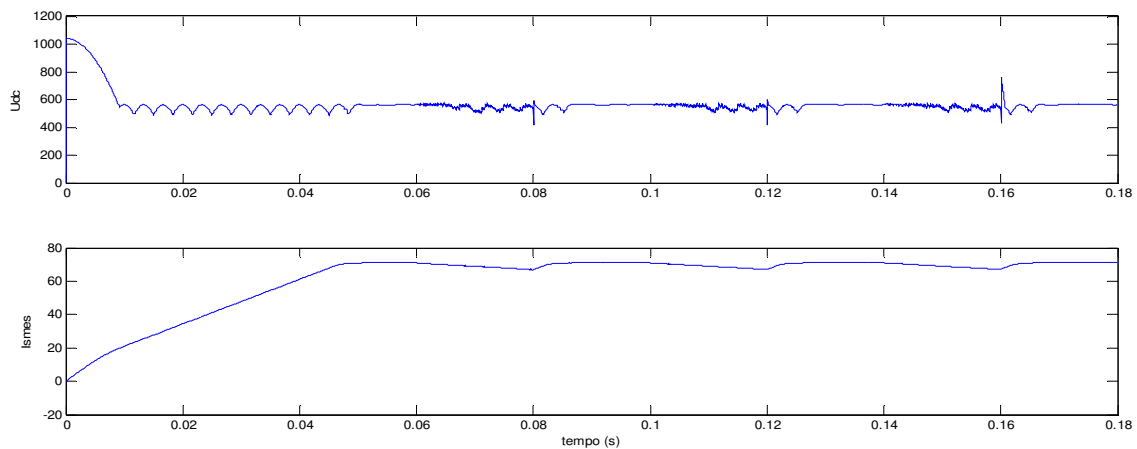


Figura 7.15. Tensão na ligação DC (superior) e corrente na bobina (inferior), para o modelo sem filtro.

7.3.5.3 Simulação do modelo com o sistema SMES, com filtro

Este modelo tem como objectivo observar a componente fundamental das formas de onda da tensão (simples e composta) e da corrente na carga para poder ver como um sistema SMES pode ser vantajoso neste tipo de problemas.

Na figura 7.16 é possível verificar as ondas referidas acima. A tensão de alimentação, $U_{s_{fonte}}$, e a tensão simples na carga, $U_{s_{carga}}$, são bastante semelhantes, apresentando apenas uma pequena distorção e um pequeno decréscimo na amplitude devido ao efeito do filtro.

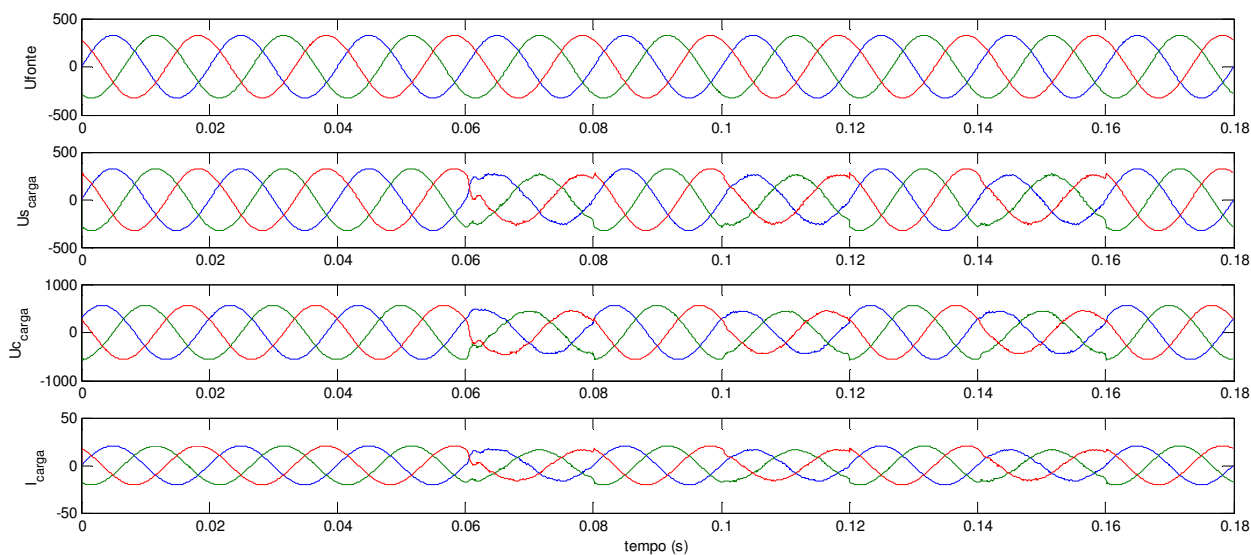


Figura 7.16. Resultado de simulação de modelo geral com sistema SMES e filtro.

Na figura 7.17 está ilustrada a tensão na ligação DC e a corrente na bobina. A introdução do filtro provoca um decréscimo na tensão média rectificada, o que provoca um maior tempo de carga para a bobina. No entanto, no modo descarga a tensão é um pouco superior a 563 V (565 V) para ser possível a inversão da tensão na amplitude desejada.

A corrente na bobina também está coerente com o que tinha sido visto até aqui, apresenta apenas um tempo de carga superior pela inserção, que neste caso não é muito relevante.

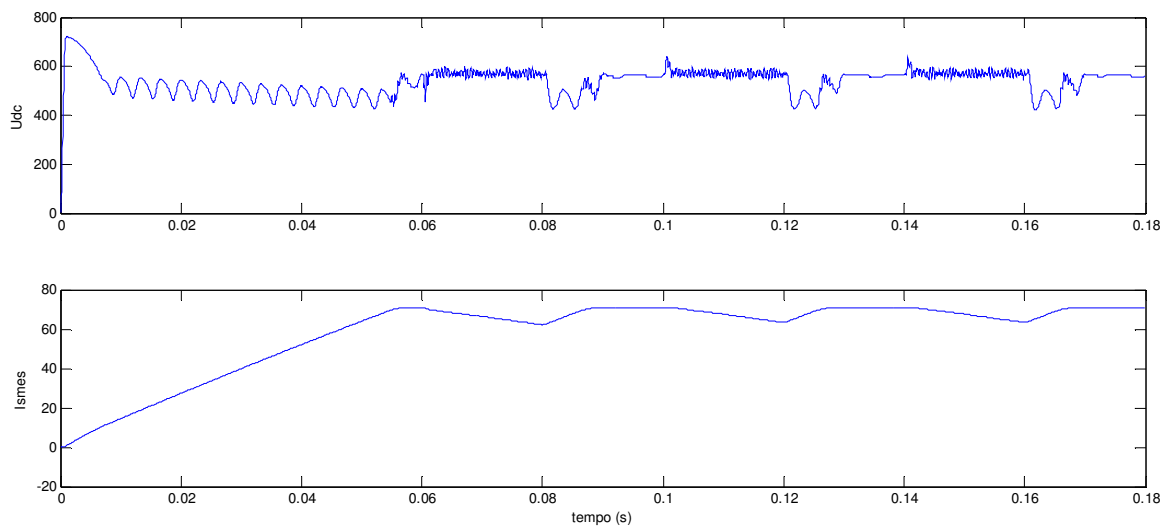


Figura 7.17. Tensão na ligação DC (superior) e corrente na bobina (inferior), para o modelo com filtro.

7.4 Conclusão

Neste capítulo foi feita uma simulação de um sistema SMES em Matlab/Simulink ® tendo em conta a teórica vista no capítulo 5.

Inicialmente foi testado o $C_{DC/DC}$ apresentando um bom desempenho. Seguiu-se para um modelo simulando um exemplo de um sistema SMES para fornecer qualidade de energia a uma carga final (que pode ser uma fabrica, etc). Os resultados apresentados, tanto pelo modelo sem o filtro, como pelo modelo com o filtro, são bastantes aceitáveis pois estão bastante coerentes com os teóricos.

Conclusão

Nesta dissertação apresentou-se um estudo genérico do sistema SMES. Fez-se uma análise teórica para a aplicação deste para uma determinada perturbação, pois cada sistema SMES deve ser projectado tendo em conta a perturbação e o segmento da rede onde seja aplicado.

Foi apresentado um dimensionamento muito breve de uma bobina tendo como objectivo minimizar a quantidade de supercondutor. De forma a verificar a viabilidade de um sistema SMES implementou-se e simulou-se este aplicado a um consumidor final resolvendo, com eficácia, das perturbações (interrupções de tensão) que se faziam sentir na carga.

Como trabalho futuro seria interessante o dimensionamento completo, para uma posterior construção, de uma bobina supercondutora e testar esta num ambiente real.

Seria bem mais interessante e útil (bem como mais dispendioso economicamente) a construção de todo o sistema para um problema real e desta forma validar os resultados obtidos neste trabalho. Desta forma fica nesta dissertação um estudo dos SMES e os principais passos para o projecto de um sistema SMES.

Referências

- [1] Weinstock, H., “Application of Superconductivity”, NATO ASI series, 1997.
- [2] Moloká, S., Greca, L., Rybár, P., “MRI Device – Alternative for electrical energy storage”, ISSN 0543-5846 METABK 47(1) 65-68 (2008).
- [3] Buckles, W., Hassenzahl, W., “Superconducting Magnetic Energy Storage”, IEEE Power Engineering Review, May 2000.
- [4] Rogers, J., Boenig, H., Bronson, J., Colyer, D., Hassenzahl, W., Turner, R., Schermer, R., “30-MJ superconducting magnetic energy storage (SMES) unit for stabilizing an electric transmission system”, IEEE Transactions on Magnetics, pp.820-823, vol.15, 1979.
- [5] Yoshihara, T., Masuda, M., Shintomi, T., Hasegawa, J., “Design study of SMES system using high temperature superconductors”, IEEE Transactions on Magnetics, 891-894, vol. 24, 1988.
- [6] Rogers, J., Barron, M., Boenig, H., Criscuolo, A., Dean, J., Schermer, R., “Superconducting magnetic energy storage for BPA transmission line stabilization”, IEEE Transactions on Magnetics, pp. 1078-1080, vol. 19, 1983.
- [7] Kaminosono, H., Tanaka, T., Ishikawa, T., Akita, S., “Characteristics of superconducting magnetic energy storage (SMES) energized by a high-voltage SCR converter”, IEEE Transactions on Magnetics, pp.1063-1066, vol, 1983.
- [8] Shintomi, T., Masuda, M., Kaminosono, H., Tanaka, T., Ishikawa, T., Akita, S., “Experimental study of power system stabilization by superconducting magnetic energy storage”, IEEE Transactions on Magnetics, pp.350-353, vol. 19, 1983.
- [9] Shintomi, T., Masuda, “The conceptual design of utility-scale SMES”, IEEE Transactions on Magnetics, pp.549-552, vol. 23, 1987.
- [10] Hayakawa, K., Shintomi, T., Masuda, M., Hasegawa, J., “Test plant as the first step towards commercialization of SMES for utilities”, IEEE Transactions on Magnetics, pp.887-890, vol. 24, 1988.
- [11] Hayashi, H., Honda, K., Kanetaka, H., Sannomiya, T., Imayoshi, T., Tsutsumi, k., Irie, F., Takeo, M., Funaki, K., Ezaki, T., Okapa, H., Ito, R., Sumiyoshi, F., Ioka, S., Atano, K., Nose, S., Yamamura, H., “Results of tests on components and the system of 1 kWh/ 1 MW module-type SMES”, IEEE Transactions on Applied Superconductivity, pp.313-317, vol. 9, 1999.

- [12] Imayoshi, T., Kanetaka, H., Hayashi, H., Honda, K., Tsutsumi, K., Irie, F., Takeo, M., Funaki, K., Okapa, H., Ezaki, T., Sumiyoshi, F., “Development of a 1 kWh-class modulate-type SMES-design study”, IEEE Transactions on Applied Superconductivity, pp. 844-848, vol.7, 1997.
- [13] Salbert, H., Krischel, D., Hobl, A., Schillo, M., Blacha, N., Tromm, A., Roesgen, W., “2MJ SMES for na uninterruptible power supply”, IEEE Transactions on Applied Superconductivity, pp. 777-779, vol. 10, 2000.
- [14] Tixador, P., “Superconducting Magnetic Energy Storage: Status and Perspective”, IEEE/CSC & ESAS European Superconductivity New Forum, January 2008.
- [15] Steurer, M., Loungo, C.A., Ribeiro, P.R., Eckroad, S., “Interaction between a superconducting coil and the power electronics interface on a 100MJ SMES system”, IEEE Transactions on Applied Superconductivity, pp. 1806-1809, vol.13, 2003.
- [16] Schoenung, S.M., Meier, W. R., Hull, J.R., Fagaly, R. L., Heiberger, M., Stephens, R. B., Leur, L. A., Guzman, R. A., “Design aspects of mid-size SMES using high temperature superconductors”, IEEE Transactions on Applied Superconductivity, pp. 234-237, vol.3, 1993.
- [17] Schoenung, S. M., Meier, W. R., Fagaly, R. L., Heiberger, M., Stephens, R. B., Leuer, J. A., Guzman, R. A., “Design, performance, and cost characteristics of high temperature superconducting magnetic energy storage”, IEEE Transactions on Energy Conversion, pp. 33-39, vol.8, 1993.
- [18] Ise, T., Murakami, Y., “Control of a superconducting coil by a MOSFET power converter operating at near liquid nitrogen temperature”, IEEE Transactions on Magnetics, pp. 2020-2023, vol. 27, 1991.
- [19] Kalsi, S.S., Aized, D., Conner, B., Snitchier, G., Campbell, J., Schwall, R.E., Kellers, J., Stephanblome, T., Troumm, A., Winn, P., “HTS SMES magnet design and test results”, IEEE Transactions on Applied Superconductivity, pp. 971-976, vol. 7, 1997.
- [20] Friedman, A., Shaked, N., Perel, E., Sinvani, M., Wolfus, Y., Yeshurum, Y., “Superconducting magnetic energy storage device operating at liquid nitrogen temperatures”, Cryogenics, pp. 53-58, vol. 39, 1999.
- [21] Friedman, A., Shaked, N., perel, E., Gartzaman, F., Sinvani, M., Wolfus, Y., Kottick, D., Furman, J., Yeshurum, Y., “HTS-SMES operating at liquid nitrogen temperatures for electric power quality improvement demonstrating”, IEEE Transactions on Applied Superconductivity, pp. 1875-1878, vol.13, 2003.

- [22] Seong, K. C., Kim, H. J., Kim, S. W., Cho, J. W., Kwon, Y. K., Ryu, K. S., Yu, I. K., Hahn, S. Y., "Current status of SMES in Korea", Cryogenics, 2002.
- [23] Kim, J. H., Hahn, S-y., Im, C. H., Kim, J. K., Hahn, S. Y., "Design of 200kJ HTS SMES system", MT-17 conference, 2001.
- [24] Mikkonen, R., "Highlights of SC power applications in Europe", IEEE Transactions on Applied Superconductivity, pp. 782-787, vol. 12, 2002.
- [25] Kreutz, R., Salbert, H., Krischel, D., Hobl, A., Radermacher, C., Blacha, N., Behrens, P., Dutsch, K., "Design of a 150 kJ high-Tc SMES (HSMES) for a 20kVA uninterruptible power supply system", IEEE Transactions on Applied Superconductivity, pp. 1860-1862, vol. 13, 2003.
- [26] Rodrigues, L., *Apontamentos da disciplina de Energias Renováveis e Transporte*. Universidade Nova de Lisboa: Faculdade de Ciências e Tecnologia, 2005.
- [27] Ostermann, F., Ferreira, L., M., "Preparing teachers to discuss superconductivity at high school level: a didactical approach", IOP Publishing Ltd, 2006.
- [28] Cachada, C., Coelho, A., Lopes, G., "Supercondutores", 2003.
- [29] Hassenzahl, W., Johnson, B., Reis, C., "Electric Power Applications of Superconductivity", IEEE, October 2004.
- [30] Tixador, P., "Transformadores & SMES", European Summer School on Superconductivity, Pori, Finland, June 2008.
- [31] Xue, X., Cheng, K., Sutanto, D., "A study of status and future of superconducting magnetic energy storage in power system", IOP, 2006.
- [32] Ribeiro, P., Johnson, B., Crow, M., Arsoy, A., Liu, Y., "Energy Storage System for Advanced Power Applications", IEEE, 2001.
- [33] <http://www.energyvortex.com>.
- [34] Magro, M., Mariscotti, A., Picco, E., Pinceti, P., "Detection of Voltage Transients to Select and Trigger Control Rules of SMES for Power Quality Applications", IEEE, 2004.
- [35] Maeda, H., Tanaka, Y., Fukutumi, M., Asano, T., "A New High-Tc Oxide Superconductor without a Rare Earth Element", 1988.
- [36] Santos, D. I., *et al.*, "Estudo das propriedades da ceramic BSCCO contend diversas proporções de pó de prata metálica pura", acessível na página da Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", em <http://www.unesp.br/prope/projtecn/Industria/Industr25.htm>.

- [37] Gomes, J., Bispo, E., R., Polasek, A., Amorim, H., S., Ogasawara, T., “Análise quantitativa de fases presentes no processamento do supercondutor (BI,PB)-2223 por fusão e recristalização”, UFRJ-Br, 2000.
- [38] Palma, João C. P. Accionamentos Electromecânicos de Velocidade *Variável*. Lisboa : Fundação Calouste Gulbenkian, 1999.
- [39] Louro, F., Lopes, J., Palma, J., Margato, E., “Conversor ac-dc reversível para adaptação a variadores de velocidade industriais”, ISEL, 2002.
- [40] Rashid, M., H., “Power Electronics Handbook”, Academic Press, 2001
- [41] Silva, R. N. Apontamentos da disciplina de Teoria de Controlo. Universidade Nova de Lisboa : Faculdade de Ciências e Tecnologia, 2005.
- [42] Boyes, J., D., “Technologies for Energy Storage Flywheels and Super Conducting Magnetic Energy Storage”, Sandia National Laboratories, 2000.
- [43] Bi-2223 HTS Insulated Wire, <http://www.innost.com>.
- [44] Michels, L., Camargo, R., Fernando Botterón, F., Pinheiro, H., “Metodologia de Projecto de filtros de segunda ordem para inversores de tensão com modulação PWM digital”, Revista Controle & Automação/ Vol.16 no.2/Abril, Maio e Junho 2005.
- [45] Ventim-Neves, M., “Apontamentos da disciplina de Energias Renováveis e Transporte: Trifásicos – Componentes Simétricos.”, Universidade Nova de Lisboa: Faculdade de Ciências e Tecnologia, 2009.

Anexo I

Transformada de Clarke e Park [38,45]

As tensões, correntes e os fluxos trifásicos podem ser representados por vectores espaciais. Para transformar o sistema trifásico variável num sistema trifásico, com componente homopolar, invariável são efectuadas as seguintes transformações:

- Transformação de Clarke $(a,b,c) \rightarrow (\alpha\beta 0)$
- Transformação de Park $(\alpha\beta 0) \rightarrow (dq0)$

A componente homopolar (índice 0), é proporcional à soma das fases a,b,c iniciais. Assim, se os sistemas iniciais abc tiverem soma nula ($a+b+c=0$), as transformadas de Clarke e de Park fornecem “trifásicos” em que uma das componentes é nula, ficando apenas duas não nulas.

A transf de Clarke e também a de Park transformam o sistema inicial abc em $\alpha\beta 0$ e $dq0$, respectivamente, ambas a partir de abc. Pelo facto de todas as transformações serem lineares, é possível obter uma transformação linear para passar de $\alpha\beta 0$ para $dq0$.

A transformação de Clarke é real, e pode portanto ser aplicada a valores instantâneos. É usada em problemas envolvendo máquinas eléctricas mas também em transitórios de linhas.

Esta transformação permite representar um sistema de grandezas vectoriais trifásicas de soma nula (e por isso sem componente homopolar) num referencial ortogonal estacionário $\alpha\beta$, onde α e β são os eixos directo e em quadratura, respectivamente (figura 1).

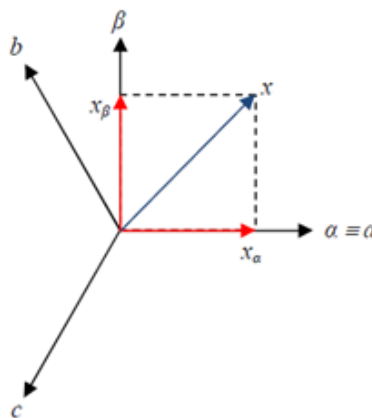


Figura 1. Diagrama fasorial da transformação de Clarke.

A conversão do sistema trifásico abc num sistema estático $\alpha\beta 0$ caracteriza-se pela seguinte equação matricial:

$$[x_{\alpha\beta 0}] = k \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \sin \theta & -\sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \cdot [x_{abc}]$$

Fazendo o eixo α coincidir com a fase a ($\theta=0$), a equação anterior fica simplificada da seguinte forma:

$$[x_{\alpha\beta 0}] = k \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \cdot [x_{abc}]$$

onde o valor do escalar k depende da convenção utilizada, sendo $\sqrt{2/3}$ se se considerar a invariância da potência (transformada normalizada).

Com a passagem deste referencial estacionário para um referencial arbitrário dq que roda a uma velocidade angular ω (figura 2), encontram-se a transformada de Park que é dada por:

$$[u_{dq0}] = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta & 0 \\ -\sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot [u_{\alpha\beta 0}]$$

onde $\theta(t) = \int_0^t \omega(\tau) d\tau + \theta(0)$.

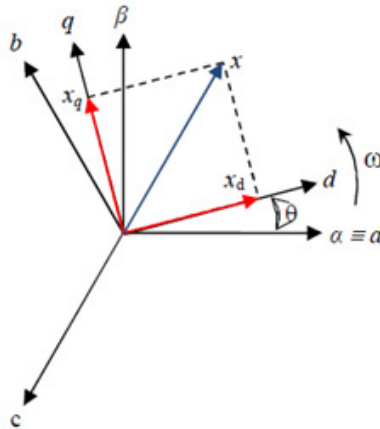


Figura 2. Diagrama fasorial da transformação de Park.

Após as transformações de Clarke e Park, o sistema trifásico sem componente homopolar toma a forma de um sistema invariante no tempo num referencial difásico girante.

Esta operação pode ser invertida por aplicação da transformada inversa de Park:

$$[x_{\alpha\beta}] = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \cdot [x_{dq}]$$

seguida pela transformação inversa de Clarke:

$$[x_{abc}] = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \cdot [x_{\alpha\beta}]$$